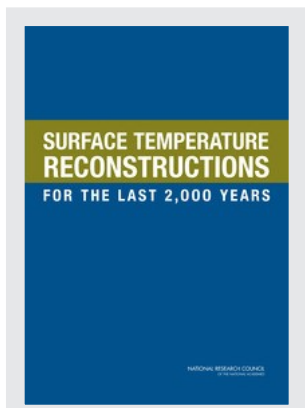


Tento soubor PDF je k dispozici na adrese

<http://nap.edu/11676>

SHARE



Rekonstrukce povrchové teploty za posledních 2000 let (2006)

PODROBNOSTI

160 stran | 7 x 10 | PAPERBACK

ISBN 978-0-309-10225-4 | DOI 10.17226/11676

PŘÍSPĚVATELÉ

Výbor pro rekonstrukci povrchových teplot za posledních 2000 let; Rada pro atmosférické vědy a klima; Oddělení pro studium Země a života;
Národní rada pro výzkum

NAVRHOVANÁ CITACE

Národní rada pro výzkum 2006. *Rekonstrukce povrchové teploty za posledních 2000 let*. Washington, DC: The National Academies Press.
<https://doi.org/10.17226/11676>.

ZÍSKEJTE TUTO
KNIHU

NAJÍT SOUVISEJÍCÍ
TITULY

Navštivte stránky National Academies Press na adrese NAP.edu a přihlaste se nebo zaregistrujte, abyste získali:

- Přístup k bezplatnému stažení tisíců vědeckých zpráv ve formátu PDF
- 10% sleva z ceny tištěných titulů
- upozornění na nové tituly související s vašimi zájmy e-mailem nebo na



Distribuce, zveřejňování nebo kopírování tohoto PDF je bez písemného souhlasu National Academies Press přísně zakázáno. (Vyžádejte si povolení) Pokud není uvedeno jinak, jsou všechny materiály v tomto PDF chráněny autorskými právy Národní akademie věd.

POVRCHOVÁ TEPLOTA REKONSTRUKCE ZA POSLEDNÍCH 2,000 LET

Výbor pro rekonstrukce povrchových teplot za posledních 2000 let Rada pro

atmosférické vědy a klima

Oddělení studií Země a života

NATIONAL RESEARCH COUNCIL
OF THE NATIONAL ACADEMIES

THE NATIONAL ACADEMIES PRESS
Washington, D.C.
www.nap.edu

THE NATIONAL ACADEMIES PRESS 500 Fifth Street NW Washington, DC 20001

UPOZORNĚNÍ: Projekt, který je předmětem této zprávy, byl schválen správní radou Národní rady pro výzkum, jejíž členové pocházejí z rad Národní akademie věd, Národní akademie inženýrství a Lékařského institutu. Členové výboru odpovědného za tuto zprávu byli vybráni s ohledem na jejich zvláštní kompetence a s ohledem na vhodnou vyváženost.

International Standard Book Number-10: 0-309-10225-1 (kniha)

International Standard Book Number-13: 978-0-309-10225-4 (kniha)

International Standard Book Number-10: 0-309-66144-7 (PDF)

International Standard Book Number-13: 978-0-309-66144-7 (PDF)

Další kopie této zprávy jsou k dispozici v National Academies Press, 500 Fifth Street, N.W., Lockbox 285, Washington, D.C. 20055; (800) 624-6242 nebo (202)334-3313 (v oblasti Washingtonu); Internet, <http://www.nap.edu>.

Copyright 2006: Národní akademie věd. Všechna práva vyhrazena.

Vytištěno ve Spojených státech amerických

THE NATIONAL ACADEMIES

Advisers to the Nation on Science, Engineering, and Medicine

Národní akademie věd je soukromá, nezisková, samosprávná společnost významných vědců zabývajících se vědeckým a technickým výzkumem, která se věnuje rozvoji vědy a techniky a jejich využití pro obecné blaho. Na základě statutu, který jí udělil Kongres v roce 1863, má Akademie mandát, který jí ukládá poskytovat poradenství federální vládě ve vědeckých a technických otázkách. Dr. Ralph J. Cicerone je prezidentem Národní akademie věd.

Národní akademie inženýrství byla založena v roce 1964 na základě statutu Národní akademie věd jako paralelní organizace významných inženýrů. Je autonomní ve své správě a ve výběru svých členů, přičemž s Národní akademií věd sdílí odpovědnost za poradenství federální vládě. Národní akademie inženýrství rovněž sponzoruje inženýrské programy zaměřené na uspokojování národních potřeb, podporuje vzdělávání a výzkum a oceňuje vynikající úspěchy inženýrů. Dr. Wm. A. Wulf je prezidentem Národní akademie inženýrství.

Institute of Medicine byl založen v roce 1970 Národní akademií věd, aby zajistil služby významných členů příslušných profesí při zkoumání politických otázek týkajících se zdraví veřejnosti. Institut působí na základě odpovědnosti, kterou Národní akademii věd svěřil její kongresový statut, aby byla poradcem federální vlády a z vlastní iniciativy určovala otázky lékařské péče, výzkumu a vzdělávání. Dr. Harvey V. Fineberg je prezidentem Institute of Medicine.

Národní rada pro výzkum byla založena Národní akademií věd v roce 1916, aby spojila širokou vědeckou a technickou obec s cíli Akademie, kterými jsou prohlubování znalostí a poradenství federální vládě. Rada, která funguje v souladu s obecnými zásadami stanovenými Akademií, se stala hlavní provozní agenturou Národní akademie věd i Národní akademie techniky při poskytování služeb vládě, veřejnosti a vědeckým a technickým komunitám. Rada je spravována společně oběma akademiemi a Lékařským institutem. Dr. Ralph J. Cicerone a Dr. Wm. A. Wulf jsou předsedou a místopředsedou Národní rady pro výzkum.

www.national-academies.org

**VÝBOR PRO REKONSTRUKCE POVRCHOVÝCH TEPLŮ ZA
POSLEDNÍCH 2000 LET**

GERALD R. NORTH (*předseda*), Texas A&M University, College Station
FRANCO BIONDI, University of Nevada, Reno
PETER BLOOMFIELD, North Carolina State University, Raleigh
JOHN R. CHRISTY, University of Alabama, Huntsville
KURT M. CUFFEY, University of California, Berkeley
ROBERT E. DICKINSON, Georgia Institute of Technology, Atlanta
ELLEN R.M. DRUFFEL, University of California, Irvine
DOUGLAS NYCHKA, Národní centrum pro atmosférický výzkum, Boulder, Colorado
BETTE OTTO-BLIESNER, Národní centrum pro atmosférický výzkum, Boulder,
Colorado
NEIL ROBERTS, University of Plymouth, Velká Británie **KARL
K. TUREKIAN**, Yale University, New Haven, Connecticut **JOHN
M. WALLACE**, University of Washington, Seattle

Zaměstnanci NRC

IAN KRAUCUNAS, ředitel studie
CHRIS ELFRING, ředitel představenstva
AMANDA STAUDT, vedoucí programová
pracovnice **ELIZABETH A. GALINIS**, výzkumná
pracovnice **LEAH PROBST**, výzkumná
pracovnice
DIANE GUSTAFSON, administrativní koordinátorka
NORMAN GROSSBLATT, vedoucí redaktor

RADA PRO VĚDY O ATMOSFÉŘE A KLIMATU

ROBERT J. SERAFIN (*předseda*), Národní centrum pro atmosférický výzkum, Boulder, Colorado
M. JOAN ALEXANDER, NorthWest Research Associates/CORA, Boulder, Colorado
FREDERICK R. ANDERSON, McKenna Long & Aldridge LLP, Washington, D.C.
MICHAEL L. BENDER, Princeton University, New Jersey
ROSINA M. BIERBAUM, University of Michigan, Ann Arbor
MARY ANNE CARROLL, University of Michigan, Ann Arbor
CAROL ANNE CLAYSON, Florida State University, Tallahassee
WALTER F. DABBERDT, Vaisala Inc., Boulder, Colorado
KERRY A. EMANUEL, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge
DENNIS L. HARTMANN, Washingtonská univerzita, Seattle
PETER R. LEAVITT, Weather Information Inc., Newton, Massachusetts
JENNIFER A. LOGAN, Harvardova univerzita, Cambridge, Massachusetts
VERNON R. MORRIS, Howardova univerzita, Washington, D.C.
F. SHERWOOD ROWLAND, University of California, Irvine
THOMAS H. VONDER HAAR, Colorado State University/CIRA, Fort Collins
ROGER M. WAKIMOTO, Národní centrum pro výzkum atmosféry, Boulder, Colorado

Členové ex offo

ANTONIO J. BUSALACCHI, JR., University of Maryland, College Park
ERIC F. WOOD, Princeton University, New Jersey

Zaměstnanci NRC

CHRIS ELFRING, ředitel
PAUL CUTLER, vedoucí programový pracovník
AMANDA STAUDTOVÁ, vedoucí programová pracovníce
MARIA UHLEOVÁ, programová pracovníce
IAN KRAUCUNAS, zástupce programového pracovníka
CLAUDIA MENGELT, zástupce programového pracovníka
ELIZABETH A. GALINIS, výzkumná pracovníce
LEAH PROBST, výzkumná pracovníce
ROB GREENWAY, vedoucí programový asistent
DIANE GUSTAFSON, administrativní koordinátor
ANDREAS SOHRE, finanční asistent

Předmluva

Naše znalosti o klimatu a jeho proměnách v čase se rychle vyvíjejí s tím, jak se získávají nová data a používají nové výzkumné nástroje a metody. Proto jsem v roce 2005 navrhl Kongresu USA, aby Národní rada pro výzkum (NRC) pomohla odpovědět na otázky týkající se údajů a metod, které byly použity při konstrukci záznamů o teplotách zemského povrchu z dob, kdy neexistovaly žádné vědecké instrukce, a to pomocí zástupných ukazatelů. Jak se změnila teplota v průběhu posledních 2 000 let? Jak jistá je odpověď na tuto otázku?

Následně si tuto studii vyžádal zástupce Sherwood Boehlert, předseda Výboru pro vědu Sněmovny reprezentantů USA. Předseda Boehlert požadoval jasnou a stručnou zprávu v relativně krátké době a NRC souhlasil s rychlým provedením studie. Byl vytvořen výbor *ad hoc*, přičemž skupina byla pečlivě sestavena tak, aby zahrnovala širokou a hlubokou odbornost a perspektivy potřebné k analýze všech aspektů způsobu odhadu a interpretace povrchových teplot a k obecnému vyjádření k vědeckým poznatkům o klimatu. NRC požádala výbor, aby shrnul současné vědecké informace o teplotních záznamech za poslední dvě tisíciletí, popsal hlavní oblasti nejistoty a jejich význam, popsal hlavní používané metodiky a případné problémy s těmito přístupy a vysvětlil, jak zásadní je debata o paleoklimatických teplotních záznamech pro stav vědeckých poznatků o globálních změnách klimatu.

Výbor připravil zprávu, která podle mého názoru poskytuje tvůrcům politik a vědecké komunitě kritický pohled na rekonstrukce povrchových teplot a jejich vývoj v čase, jakož i dobrou představu o tom, jak důležité je naše chápání paleoklimatických teplotních záznamů v rámci celkového stavu vědeckých poznatků o globální změně klimatu. Zpráva neobsahuje politická doporučení.

Děkuji členům výboru, kteří intenzivně pracovali na přípravě této pečlivé zprávy v krátkém čase a věnovali jí mnoho osobního času, znalostí a energie.

Zásadní roli sehráli pracovníci NRC a všichni ti, kteří přispěli dokumenty, údaji, grafikou a dalšími informacemi, stejně jako nezávislí odborníci, kteří se podíleli na přísném recenzním řízení.

Ralph J. Cicerone,
prezident Národní akademie věd
Předseda Národní rady pro
výzkum

Předmluva

Tento výbor byl požádán, aby popsal a zhodnotil stav vědeckého úsilí o rekonstrukci záznamů povrchové teploty Země za posledních přibližně 2 000 let. (Úplné znění zadání je uvedeno v příloze A.) Za normálních okolností by technický problém, jako je rekonstrukce povrchových teplot, nemusel vyvolat širokou pozornost, ale tento případ přináší zajímavé poznatky o tom, jak věda funguje a jak je věda, zejména klimatická, sdělována politikům a veřejnosti. Debata začala v roce 1998, kdy byl v časopise *Nature* publikován článek Michaela Manna, Raymonda Bradleyho a Malcolma Hughese. Autoři použili novou metodiku kombinování údajů z řady zdrojů k odhadu teplot na severní polokouli za posledních šest století a později za posledních 1 000 let. Tomuto výzkumu se dostalo široké pozornosti, mimo jiné proto, že byl ilustrován jednoduchým grafem, tzv. křivkou hokejky, kterou mnozí interpretovali jako definitivní důkaz antropogenních příčin nedávných klimatických změn. Výzkum získal významnou pozici ve zprávě Mezivládního panelu pro změnu klimatu z roku 2001 a poté se ho chopili mnozí členové širší vědecké komunity a populární média.

Věda je procesem zkoumání myšlenek - navrhují se hypotézy a provádí se výzkum, který je zkoumá. Další vědci se danou problematikou zabývají, přinášejí podpůrné nebo popírací důkazy a každá hypotéza buď přežije další kolo, rozvine se do dalších myšlenek, nebo se prokáže jako mylná a je zamítnuta. V případě hokejky probíhal vědecký proces několik posledních let, kdy mnoho vědců testovalo a diskutovalo o výsledcích. Kritici původních prací namítali, že statistické metody byly chybné, že výběr dat byl neobjektivní a že použité údaje a postupy nebyly sdíleny, aby si ostatní mohli práci ověřit. Tato zpráva je příležitostí prozkoumat silné stránky a omezení rekonstrukcí povrchových teplot a roli, kterou hrají při zlepšování našich znalostí o klimatu. Rekonstrukce, kterou vypracoval Dr. Mann a jeho kolegové, byla pouze jedním z kroků v dlouhém procesu výzkumu a není (jak se někdy prezentuje) rozhodujícím argumentem pro antropogenní globální oteplování, ale spíše jedním z mnoha nezávislých směrů výzkumu globálních změn klimatu.

Využití více typů proxy dat k odvození časových řad teplot v rozsáhlých geografických oblastech je relativně novou oblastí vědeckého výzkumu, ačkoli navazuje na značný pokrok, kterého bylo dosaženo při odvozování minulých teplotních změn v jednotlivých lokalitách a místních regionech. Rekonstrukce povrchové teploty často kombinují data z řady specializovaných oborů a jen málo jedinců má odborné znalosti ve všech aspektech této práce. Postupy pro práci s těmito daty se vyvíjejí - neexistuje jediný "správný" způsob, jak postupovat. Domnívám se, že tento obor se vyvíjí zdravým směrem. Stejně jako ve všech vědeckých činnostech je výzkum uváděný ve vědecké literatuře často "rozpracovanou prací" zaměřenou na jiné badatele, ne vždy je třeba jej brát jako individuální výzvu k činnosti v politické komunitě.

V tomto kontextu výbor zvažil rozsáhlou literaturu týkající se jeho úkolů a obdržel informace a písemné příspěvky od více než dvou desítek osob. Naši zprávu jsme sestavili s vědomím, že máme přinejmenším dvě různé skupiny čtenářů - vědeckou komunitu a politickou komunitu. Hlavní závěry výboru jsou uvedeny ve shrnutí a vysvětleny v přehledu netechnickým jazykem. Rozsáhlejší technické zdůvodnění závěrů výboru včetně odkazů je uvedeno v následujících kapitolách.

Závěrem mi dovoluňte poděkovat členům Výboru pro rekonstrukce povrchových teplot za posledních 2000 let. Výbor neúnavně pracoval na zhodnocení stavu této oblasti výzkumu, aby veřejnost přesně viděla, o co se jedná, co o ní v současné době víme a jaké jsou vyhlídky na zlepšení našich znalostí. Snažili jsme se objasnit, jak tato část klimatické skládačky zapadá do širších diskusí o globálních změnách klimatu.

Gerald R. North, *předseda*
Výbor pro rekonstrukce povrchové teploty
za posledních 2000 let

Poděkování

Tato zpráva byla v souladu s postupy schválenými Výborem pro posuzování zpráv Národní rady pro výzkum (National Research Council's Report Review Committee) posouzena v podobě návrhu osobami vybranými pro jejich různorodé pohledy a technické znalosti. Účelem tohoto nezávislého přezkumu je poskytnout upřímné a kritické připomínky, které instituci pomohou, aby její zveřejněná zpráva byla co nejsprávnější, a zajistit, aby zpráva splňovala institucionální standardy objektivity, důkazů a odpovídala zadání studie. Připomínky k recenzi a návrh rukopisu zůstávají důvěrné, aby byla chráněna integrita procesu projednávání. Za posouzení této zprávy děkujeme následujícím osobám:

David Brillinger, University of California, Berkeley
David Chapman, University of Utah
Julia Cole, University of Arizona
Thomas Crowley, Duke University
Alexander Flax, nezávislý konzultant
Claus Fröhlich, PMOD Technologies
Ricardo Garcia-Herrera, Universidad Complutense de Madrid
Peter Huybers, Woods Hole Oceanographic Institution
Richard Muller, Lawrence Berkeley Laboratory
Robert Stine, University of Pennsylvania
Lonnie Thompson, Ohio State University
Connie Woodhouse, Národní úřad pro oceán a atmosféru
Carl Wunsch, Massachusettský technologický institut

Přestože výše uvedení recenzenti poskytli mnoho konstruktivních připomínek a návrhů, nebyli požádáni o schválení závěrů nebo doporučení, ani neviděli konečný návrh zprávy před jejím vydáním. Na revizi této zprávy dohlíželi Andrew R. Solow, Woods Hole Oceanographic Institution, a Louis J. Lanzerotti, New

Technologický institut v Jersey. Byli jmenováni Národní radou pro výzkum a zodpovídali za to, že nezávislé přezkoumání této zprávy bylo provedeno v souladu s institucionálními postupy a že byly pečlivě zváženy všechny připomínky. Odpovědnost za konečný obsah této zprávy nese plně autorský výbor a instituce.

Obsah

SHRNUTÍ	1
PŘEHLED	5
1 ÚVOD DO TECHNICKÝCH KAPITOL	25
Koncepty a definice, 25	
Přisuzování globálního oteplování lidským vlivům, 27	
Struktura zprávy, 28	
2 INSTRUMENTÁLNÍ ZÁZNAM	29
Instrumentální data, 30	
Vlastnosti instrumentálního záznamu, 30	
Nejistoty a chyby spojené s přístrojovým záznamem, 33	
Problémy s prostorovým vzorkováním, 35	
3 DOKUMENTÁRNÍ A HISTORICKÉ DŮKAZY	38
Typy důkazů, 38	
Omezení a přínosy historických a dokumentárních zdrojů, 39	
Systematické rekonstrukce klimatu odvozené z historických archivů, 40	
Důsledky klimatických změn pro minulé společnosti, 43	
4 STROMOVÉ KROUŽKY	45
Definice a předpoklady, 45	
Terénní a laboratorní metody, 47	
Rekonstrukce teploty, 48	
5 MOŘSKÉ, JEZERNÍ A JESKYNNÍ PROXY.	53
Korály, 54	
Mořské sedimenty, 58	

	Jezerní a rašelinové sedimenty, 60	
	Speleotémy, 62	
	Shrnutí, 64	
6	LEDOVÉ IZOTOPY	65
	Fyzikální základ pro odvození klimatických signálů ze záznamů izotopového poměru ledu, 66 Kalibrace a rozlišení, 67	
	Výsledky záznamů izotopového poměru ledu, 67	
7	ZÁZNAMY O DÉLCE LEDOVCE A HMOTNOSTNÍ BILANCI	71
	Rekonstrukce teplotních záznamů ze záznamů ledovců, 72	
	Podrobnější informace o rekonstrukcích založených na délce ledovce, 72	
	Další informace dostupné z ledovců, 75	
8	BOREHOLES	77
	Vrty v horninách a věčně zmrzlé půdě, 78	
	Limity rekonstrukcí na základě vrtů, 80 Vrty v ledovcovém ledu, 81	
9	STATISTICKÉ PODKLADY	83
	Lineární regrese a rekonstrukce proxy, 84 Regrese hlavních komponent, 89	
	Validace a predikční schopnost proxy rekonstrukce, 92 Kvantifikace plné nejistoty rekonstrukce, 95	
10	KLIMATICKÉ VLIVY A KLIMATICKÉ MODELY	98
	Klimatické vlivy, 99	
	Simulace klimatických modelů, 105	
	Antropogenní vlivy a nedávná změna klimatu, 107	
11	ROZSÁHLÉ MULTIPROXY REKONSTRUKČNÍ TECHNIKY	110
	Vývoj multiproxy rekonstrukčních technik, 111 Silné stránky a omezení velkoplošných rekonstrukcí teploty zemského povrchu	
	Rekonstrukce, 115	
	Celková zjištění a závěry, 117	
	Jaké připomínky lze vznést k hodnotě výměny informací a údajů?, 118	
	Co by se dalo udělat pro lepší pochopení klimatických změn za posledních 2000 let?, 119	
	ODKAZY	120
	PŘÍLOHY	
A	Prohlášení o úkolu	139
B	Kód R pro obrázek 9-2	140
C	Životopisy členů výboru	142

Souhrn

Vzhledem k tomu, že rozsáhlé a spolehlivé přístrojové záznamy jsou k dispozici pouze za posledních zhruba 150 let, vědci odhadují klimatické podmínky ve vzdálenější minulosti na základě analýzy *zástupných důkazů* ze zdrojů, jako jsou letokruhy stromů, korály, oceánské a jezerní sedimenty, jeskynní usazeniny, ledová jádra, vrty, ledovce a dokumentární důkazy. Například záznamy o délce alpských ledovců, z nichž některé pocházejí z maleb a dalších dokumentárních zdrojů, byly použity k *rekonstrukci* časové řady změn povrchové teploty v jižní a střední Evropě za posledních několik století. Studium minulého klimatu nám může pomoci zasadit oteplování ve 20. století do širšího kontextu, lépe pochopit klimatický systém a zlepšit prognózy budoucího klimatu.

Od konce 90. let 20. století začali vědci kombinovat proxy důkazy z mnoha různých lokalit ve snaze odhadnout průměrné změny povrchové teploty v rozsáhlých geografických oblastech během posledních několika set až několika tisíc let. Tyto *rozsáhlé rekonstrukce povrchových teplot* umožnily vědcům odhadnout minulé teplotní změny na severní polokouli nebo dokonce na celé zeměkouli, často s časovým rozlišením v řádu desetiletí nebo dokonce jednotlivých let. Tento výzkum, a zejména první z těchto rekonstrukcí publikovaná v letech 1998 a 1999 Michaelem Mannem, Raymondem Bradleyem a Malcolmem Hughesem, vzbudil značnou pozornost, protože autoři dospěli k závěru, že na severní polokouli bylo koncem 20. století tepleji než kdykoli jindy v uplynulém tisíciletí. Vznikla polemika, protože mnozí tento výsledek interpretovali jako definitivní důkaz antropogenních příčin nedávných klimatických změn, zatímco jiní kritizovali použité metodiky a data.

Na žádost Kongresu sestavila Národní rada pro výzkum tento výbor, aby popsal a zhodnotil stav vědeckého úsilí o rekonstrukci záznamů povrchových teplot Země za posledních přibližně 2000 let a důsledky tohoto úsilí pro naše chápání globálních změn klimatu.

Na obrázku S-1 je znázorněna kompilace velkoplošných rekonstrukcí povrchové teploty od různých výzkumných skupin, z nichž každá používá vlastní metodiku a výběr zástupných ukazatelů, a také instrumentální záznam (počínaje rokem 1856) globální průměrné povrchové teploty.

- S vysokou mírou jistoty lze říci, že průměrná globální teplota povrchu byla v posledních několika desetiletích 20. století vyšší než v jakémkoli srovnatelném období v předchozích čtyřech stoletích. Toto tvrzení je odůvodněno konzistencí důkazů z široké škály geograficky různorodých zástupných ukazatelů.

- Méně důvěry lze mít v rekonstrukce povrchových teplot ve velkém měřítku pro období od roku 900 do roku 1600 n. l. V současnosti dostupné proxy důkazy naznačují, že teploty na mnoha, ale ne na všech jednotlivých místech byly v posledních 25 letech vyšší než v jakémkoli srovnatelném dlouhém období od roku 900 n. l.. Nejistoty spojené s rekonstrukcí průměrných teplot na polokouli nebo globálních průměrných teplot z těchto údajů se výrazně zvyšují zpětně v čase v tomto období a nejsou dosud plně vyčísleny.

- Výrokům o průměrné teplotě na polokouli nebo globální průměrné teplotě povrchu před rokem 900 n. l. lze přisoudit jen velmi malou jistotu, protože pokrytí daty je řídké a nejistoty spojené s proxy daty a metodami používanými k jejich analýze a kombinaci jsou větší než v novějších časových obdobích.

Hlavním důvodem, proč je naše důvěra v rekonstrukce povrchových teplot ve velkém měřítku před rokem 1600 a zejména před rokem 900 n. l. nižší, je relativní nedostatek přesně datovaných proxy důkazů. Mezi další faktory, které omezují naši důvěru v rekonstrukce povrchových teplot, patří: relativně krátká délka instrumentálního záznamu (který se používá ke kalibraci a ověřování rekonstrukcí); skutečnost, že všechny proxy údaje jsou ovlivněny řadou klimatických proměnných; možnost, že vztah mezi proxy údaji a místními povrchovými teplotami se mohl v průběhu času měnit; nedostatek shody ohledně toho, které metody jsou nejhodnější pro kalibraci a ověřování rekonstrukcí velkého rozsahu a pro výběr proxy údajů, které mají být zahrnuty; a obtíže spojené s konstrukcí odhadu globální nebo hemisférické průměrné teploty pomocí údajů z omezeného počtu lokalit a s různou chronologickou přesností. Všechny tyto úvahy přinášejí nejistoty, které je obtížné kvantifikovat.

Navzdory těmto omezením výbor konstatuje, že snahy o rekonstrukci historie teplot v rozsáhlých geografických oblastech pomocí multiproxy metod jsou důležitým příspěvkem k výzkumu klimatu a že tyto rekonstrukce povrchových teplot ve velkém měřítku obsahují významné klimatické signály. Jednotlivé proxy řady použité k vytvoření těchto rekonstrukcí obecně vykazují silnou korelaci s místními podmínkami prostředí a ve většině případů existuje fyzikální, chemický nebo fyziologický důvod, proč proxy odráží místní změny teploty. Naše důvěra ve výsledky těchto rekonstrukcí se zvyšuje, když více nezávislých důkazů ukazuje na stejný obecný výsledek, jako v případě ochlazení v malé době ledové a oteplení ve 20. století.

Základním závěrem Manna et al. (1998, 1999) bylo, že oteplení na konci 20. století na severní polokouli nemělo v posledních 1000 letech obdoby. Tento závěr byl následně podpořen řadou důkazů, které zahrnují jak další velkoplošné rekonstrukce povrchových teplot, tak i výrazné změny v řadě lokálních proxy indikátorů, jako je tání ledovců a ústup ledovců po celém světě, které se v mnoha případech jeví jako bezprecedentní nejméně za posledních 2 000 let. Ne všechny jednotlivé proxy záznamy naznačují, že nedávné oteplení je bezprecedentní, ačkoli větší část geograficky

na konci 20. století zažila výjimečné teplo více než v jakémkoli jiném delším období od roku 900 n. l.

Na základě analýz uvedených v původních článcích Manna a kol. a těchto novějších podpůrných důkazů považuje výbor za pravděpodobné, že severní polokoule byla v posledních desetiletích 20. století teplejší než v jakémkoli srovnatelném období v předchozím tisíciletí. Značné nejistoty, které v současnosti panují v kvantitativním hodnocení velkoplošných změn povrchové teploty před rokem 1600 n. l., snižují naši důvěru v tento závěr ve srovnání s vysokou mírou důvěry, kterou přikládáme ochlazení v malé době ledové a oteplení ve 20. století. Ještě menší důvěru lze mít v původní závěry Manna et al. (1999), že "90. léta 20. století jsou pravděpodobně nejteplejším desetiletím a rok 1998 nejteplejším rokem přinejmenším za celé tisíciletí", protože nejistoty spojené s rekonstrukcemi teplot pro jednotlivé roky a desetiletí jsou větší než nejistoty pro delší časové úseky a protože ne všechny dostupné proxy údaje zaznamenávají informace o teplotě v tak krátkém časovém horizontu.

Rekonstrukce povrchových teplot pro období před průmyslovou érou jsou pouze jedním z mnoha důkazů podporujících závěr, že k oteplování klimatu dochází v důsledku lidské činnosti, a nejsou hlavním důkazem.

Rekonstrukce povrchové teploty jsou rovněž užitečným zdrojem informací o proměnlivosti a citlivosti klimatického systému. V rámci existujících nejasností simulace klimatických modelů ukazují, že odhadované změny teplot během dvou tisíciletí před průmyslovou revolucí lze věrohodně vysvětlit odhadovanými změnami slunečního záření a sopečné činnosti ve stejném období. Velkoplošné rekonstrukce povrchových teplot mají potenciál dále zlepšit naše znalosti o kolísání teplot za posledních 2 000 let, zejména pokud se podaří identifikovat a získat další proxy důkazy z oblastí, kde je pokrytí relativně řídké, a pro časová období před rokem 1600 n. l. a zejména před rokem 900 n. l. Kromě toho by bylo užitečné aktualizovat proxy záznamy, které byly shromážděny před desítkami let, aby bylo možné vytvořit spolehlivější kalibrace s instruktážními záznamy. Zlepšení přístupu k údajům používaným v publikacích by také zvýšilo důvěru ve výsledky rozsáhlých rekonstrukcí povrchových teplot uvnitř i vně vědecké komunity. Nové analytické metody nebo pečlivější využívání stávajících metod mohou také pomoci obejít některá stávající omezení spojená s rekonstrukcemi povrchové teploty na základě více zástupných ukazatelů. A konečně, protože některé z nejdůležitějších potenciálních důsledků změny klimatu jsou spojeny se změnami v regionálních cirkulačních vzorcích, hurikánové aktivitě a četnosti a intenzitě sucha a povodní, regionální a velkoplošné rekonstrukce změn dalších klimatických proměnných, jako jsou srážky, za posledních 2 000 let by poskytly cenný doplněk k těm, které jsou určeny pro teplotu.

Přehled

Země se během 20. století oteplila zhruba o 0,6 °C a předpokládá se, že se během 21. století oteplí o dalších 2–6 °C.¹ Paleoklimatologie, neboli studium minulých klimatických období, může pomoci zasadit toto oteplování do kontextu přirozené proměnlivosti klimatu. Poznatky získané při studiu minulých klimatických období lze také využít ke zlepšení prognóz, jak bude klimatický systém reagovat na budoucí změny koncentrací skleníkových plynů a dalších klimatických faktorů, a také jak mohou být ekosystémy a společnosti ovlivněny změnou klimatu.

Rozsáhlé a spolehlivé přístrojové záznamy jsou k dispozici pouze za posledních zhruba 150 let. Při studiu toho, jak se klimatické podmínky měnily před průmyslovou revolucí, se paleoklimatologové spoléhají na *zástupné důkazy*, jako jsou letokruhy stromů, korály, oceánské a jezerní sedimenty, jeskynní usazeniny, fosilie, ledová jádra, teploty z vrtů, záznamy o délce ledovců a dokumentární důkazy. Například záznamy o délce alpských ledovců, z nichž některé jsou odvozeny z maleb a dalších dokumentárních důkazů, byly použity k *rekonstrukci* časové řady změn povrchové teploty v jižní a střední Evropě za posledních několik století. Až donedávna se většina rekonstrukcí klimatických změn za posledních několik tisíc let zaměřovala na konkrétní lokality nebo regiony. Od devadesátých let 20. století začali vědci kombinovat proxy záznamy z různých geografických oblastí, často s využitím různých typů záznamů, ve snaze dokumentovat rozsáhlé klimatické změny za posledních několik tisíciletí. Většina těchto *velkoplošných rekonstrukcí povrchových teplot* se zaměřila na průměrné teploty na polokouli nebo globální průměrné teploty povrchu za posledních několik set až několik tisíc let. Tyto rekonstrukce, a zejména následující otázky, jsou předmětem této zprávy:

¹Tento přehled je psán pro netechnické publikum a používá minimální množství odkazů. Argumenty a důkazy na podporu závěrů výboru jsou diskutovány a odkazovány v kapitolách 1-11. Toto tvrzení je například podpořeno původním výzkumem Smitha a Reynoldse (2005), Jonese a dalších (2001) a Hansena a dalších (2001), jak je uvedeno v kapitole 2.

- Jaké druhy zástupných důkazů lze použít k odhadu povrchových teplot za posledních 2 000 let?
 - Jak se proxy data používají k rekonstrukci povrchových teplot v různých zeměpisných oblastech a časových obdobích?
 - Jaká je naše současná představa o tom, jak se průměrná teplota na polokouli nebo globální průměrná teplota povrchu změnila za posledních 2000 let?
 - Jaké závěry lze vyvodit z velkoplošných průzkumů povrchové teploty?
 - Jaká jsou omezení a přednosti velkoplošných průzkumů povrchové teploty?
 - Co nám klimatické modely a odhady vlivů říkají o posledních 2000 letech?
 - Jak zásadní význam mají rekonstrukce povrchových teplot ve velkém měřítku pro naše poznání globálních klimatických změn?
 - Jaký význam má výměna informací a údajů?
 - Co by se dalo udělat pro lepší pochopení změn klimatu za posledních 2000 let?

Jaké druhy zástupných důkazů lze použít k odhadu povrchových teplot za posledních 2 000 let?

Instrumentální záznamy

Kombinace přístrojových záznamů pro výpočet velkoplošných povrchových teplot vyžaduje zahrnutí dostatečného počtu přístrojových lokalit s velkým geografickým rozložením, aby bylo možné získat reprezentativní odhad. Přístrojové záznamy o teplotách sahají v některých lokalitách více než 250 let zpět, ale teprve od poloviny 19. století existuje dostatečný počet pozorovacích stanic pro odhad průměrné teploty na severní polokouli nebo na celé zeměkouli. Tropická měření jsou obzvláště užitečná pro odhad průměrné globální teploty, protože tropické teplotní výkyvy mají tendenci lépe sledovat globální průměrné výkyvy.

Dokumentární a historické záznamy

V mnoha částech světa lze záznamy o povrchových teplotách rozšířit o několik století zpět, a to na základě zkoumání historických dokumentů, jako jsou lodní deníky, deníky, soudní záznamy a data sklizně vína. Tyto důkazy ukazují, že v několika regionech bylo přibližně od roku 1500 do roku 1850, tedy v období někdy označovaném jako malá doba ledová, relativně chladno. Historické důkazy také naznačují, že zejména Evropa a východní Asie zažívaly v období středověku zhruba od roku 900 do roku 1300 n. l. období relativního tepla. Na rozdíl od rozsáhlého oteplení ve 20. století se zdá, že načasování těchto dřívějších teplejších období se v jednotlivých lokalitách lišilo, ale řídké údaje v tomto ohledu vylučují jistotu.

V oblastech, kde písmo nebylo rozšířeno nebo se nedochovalo, mohou archeologické důkazy, jako jsou vykopané ruiny, někdy také poskytnout vodítko k tomu, jak se v určitých historických obdobích mohlo měnit klima a jak na tyto změny reagovala lidská společnost. Interpretaci historických, dokumentárních a archeologických důkazů však často ztěžují faktory, jako jsou epidemie nemocí a společenské změny. Proto se klimatologové častěji spoléhají na přírodní zástupné důkazy, aby

vytvářet kvantitativní rekonstrukce minulého klimatu a používat historické a archeologické důkazy, pokud jsou k dispozici, pro kontrolu konzistence.

Kruhy stromů

Tvorba letokruhů stromů je ovlivněna klimatickými podmínkami, zejména v oblastech blízko okraje geografického rozšíření dřevin. Ve vysokých zeměpisných šířkách a/nebo ve vysokých nadmořských výškách souvisí růst letokruhů stromů s teplotou, a proto se stromy z těchto lokalit běžně používají jako základ pro rekonstrukce povrchové teploty. Jádra odebraná ze stromů poskytují každoročně rozlišované časové řady šířky letokruhů stromů a vlastností dřeva, jako je hustota a chemické složení, v rámci každého letokruhu. V některých případech lze záznamy z živých stromů porovnat se záznamy z mrtvého dřeva a vytvořit tak jedinou souvislou chronologii sahající několik tisíc let zpět.

Záznamy kroužků stromů mají pro rekonstrukci klimatu řadu výhod, včetně široké geografické dostupnosti, ročního až sezónního rozlišení, snadné replikace a vnitřně konzistentního datování. Stejně jako jiné proxy jsou letokruhy stromů ovlivňovány biologickými a environmentálními faktory jinými než klima. Pro zohlednění těchto rušivých faktorů byly vyvinuty postupy výběru lokalit a kontroly kvality. Při uplatňování těchto postupů se klade důraz na replikaci záznamů jak v rámci lokality, tak mezi lokalitami a na číselnou kalibraci s instrumentálními údaji.

Korály

Roční pásy v kostrách korálů také poskytují informace o podmínkách prostředí v době, kdy se jednotlivé pásy vytvořily. Tyto informace jsou většinou odvozeny ze změn chemického a izotopového složení² korálů, které odráží teplotu a izotopové složení vody, v níž se vytvořily. Vzhledem k tomu, že koráli žijí převážně v tropických a subtropických vodách, poskytují užitečný doplněk k záznamům odvozeným z letokruhů stromů. Chemické složení kostry korálů je ovlivněno několika proměnnými, a proto je třeba věnovat pozornost výběru vzorků korálů a odvozování klimatických záznamů z nich. Dosud byla většina rekonstrukcí klimatu na základě korálů regionálního rozsahu a omezena na posledních několik set let, ale nyní se pracuje na vytvoření delších záznamů pomocí odběru vzorků fosilních korálů.

Ledová jádra

Z izotopů kyslíku měřených v ledových jádrech získaných z ledovců a ledovcových čepiček lze odvodit teplotu v době, kdy byl sníh původně uložen. Pro posledních 2 000 let lze na většině míst určit stáří ledu spočítáním ročních vrstev. Izotopové složení ledu v každé vrstvě odráží jak teplotu v oblasti, kde se molekuly vody původně vypařovaly daleko po větru od ledovce, tak teplotu mraků, v nichž molekuly vodní páry kondenzovaly a tvořily sněhové vločky. Dlouhodobé kolísání teploty

²*Izotopické složení* určitého prvku je relativní zastoupení atomů tohoto prvku s různým počtem neutronů v jádře.

rekonstrukce odvozené z ledových jader lze porovnat s vertikálními teplotními profily ve vrtech, z nichž byly vyvrtány (viz níže). Rekonstrukce založené na izotopech ledu jsou k dispozici pouze v oblastech, které jsou pokryty ledem, jenž přetrvává v krajině (např. Grónsko, Antarktida a některá ledová pole na vrcholcích hor v Africe, Andách a Himálaji). Interpretace měření izotopů kyslíku v tropických ledových jádrech je složitější než v případě polárních oblastí, protože závisí nejen na teplotě, ale také na srážkách v přílehlých nížinách.

Mořské a jezerní sedimenty

Jádra odebraná ze sedimentů na dně jezer a oceánů lze analyzovat a získat tak důkazy o klimatických změnách v minulosti. Jádra sedimentů lze analyzovat za účelem určení teploty vody, z níž se jednotlivé složky sedimentu usazovaly. Tyto informace lze následně vztáhnout k místní povrchové teplotě. K záznamům relevantním pro teplotu patří izotopy kyslíku, poměr hořčíku a vápníku a relativní početnost různých typů mikrofosílií se známými teplotními preferencemi (např. hmyz) nebo se silnou teplotní korelací (např. diatomie a některé další řasy). Zajímavé jsou také změny vlastností sedimentů. Například během chladných epoch ledovce proudící na jih přes severní Atlantik přinášely písek a štěrk a ukládaly je do sedimentů v místech, kde tály; vlastnosti tohoto materiálu svědčí o obecně chladnějších podmínkách v oblasti, odkud ledovce pocházely.

Oceánské a jezerní sedimenty se obvykle hromadí pomalu a vrstvy v nich bývají vyhlazovány organismy žijícími na dně. Proto pouze v oblastech, kde je rychlost sedimentace mimořádně vysoká (např. Bermudský vzestup, severozápadní pobřeží Afriky) nebo v několika málo oblastech s nedostatkem kyslíku (např. povodí Santa Barbary, povodí Cariaco u Venezuely nebo v hlubokých kráterových jezerech), lze sedimenty datovat dostatečně přesně, aby poskytly informace o změnách klimatu během posledních 2 000 let. Pomaleji se hromadí sedimenty z oceánských pánví po celém světě jsou jedním z našich hlavních zdrojů informací o změnách klimatu v časovém měřítku tisíciletí a delším.

Vrty

Minulé povrchové teploty lze také odhadnout měřením vertikálního teplotního profilu ve vrtech vyvrtaných do hornin, zmrzlé půdy a ledu. Teplotní změny na zemském povrchu se s časem šíří směrem dolů stejným procesem, který způsobuje zahřívání rukojeti kovové lžičky ponořené do šálku horkého čaje. Řídící rovnici pro tento proces lze použít k převodu vertikálního profilu teploty ve vrtu na záznam povrchové teploty v závislosti na čase. Prvky ve vertikálním teplotním profilu se při šíření směrem dolů vyhlazují, což vede ke ztrátě informace. Proto rekonstrukce povrchové teploty ve velkém měřítku na základě měření ve vrtech obvykle sahají pouze několik století zpět a mají hrubé časové rozlišení.

Na severní polokouli a na menším počtu míst na jižní polokouli byly provedeny stovky vrtů do hloubky několika set metrů pod povrchem. Mnohé z těchto "vrtů příležitosti" byly vyvrtány z jiných důvodů, například pro průzkum nerostných surovin. Odborníci připouštějí několik rozdíl-

ent typy chyb v rekonstrukcích teploty na základě vrtů, jako je nedokonalá shoda mezi teplotou země a teplotou vzduchu při povrchu, ale dostupné důkazy naznačují, že tyto chyby nemají významný vliv na rekonstrukce pro velké oblasti využívající mnoho vrtů. Vrty vyvrtané skrz ledovec za účelem získání ledových jader jsou zbaveny mnoha z těchto problémů a mohou být analyzovány společně se záznamem izotopů kyslíku z příslušného jádra, což poskytuje mnohem delší a přesnější rekonstrukci teploty, než je možné u vrtů vyvrtaných skrz skálu nebo věčně zmrzlou půdu. Vrty v ledu jsou však k dispozici pouze v oblastech se silnou vrstvou ledu.

Rekordy délky ledovce

Záznamy o délce mnoha horských ledovců sahají několik stovek let do minulosti. Poměrně jednoduché modely dynamiky ledovců lze použít k tomu, aby se změny rozlohy ledovců vztahovaly k místním změnám teploty v časovém měřítku několika desetiletí. Míra oteplování odvozená touto technikou se poměrně dobře srovnává s místními měřeními za posledních zhruba sto let.

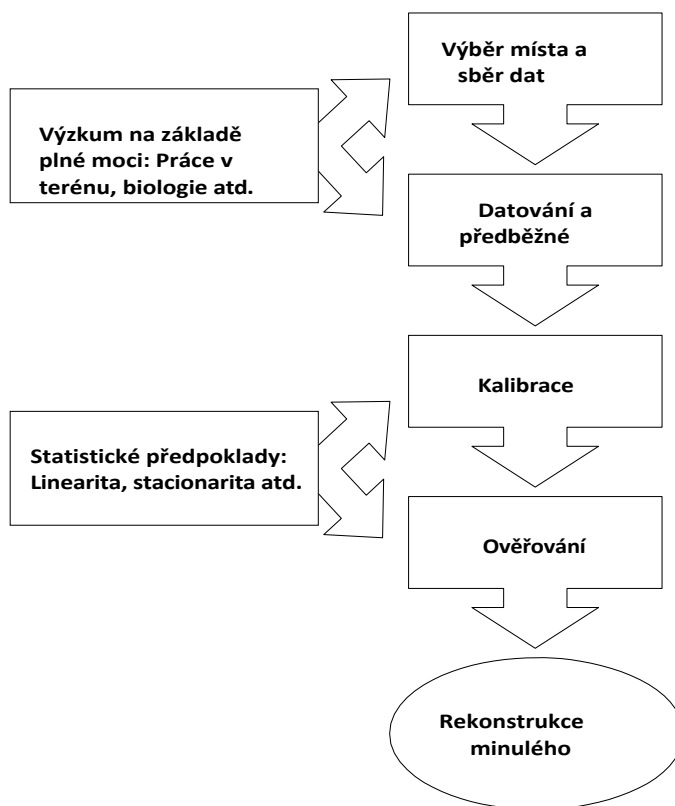
Většina záznamů o délce ledovců je odvozena z přímých pozorování zaznamenaných v historických záznamech, například z maleb, které ukazují, jak daleko sahaly místní ledovce do svých údolí v určitých historických obdobích. K odvození rozsahu ledovců v minulosti lze použít také přírodní důkazy. Například za rychle ustupujícími ledovci byly nedávno na několika místech objeveny organické materiály, jako jsou keře. Tyto relikt, které byly usmrceny a začleněny do ledu, když je ledovec překryl v době, kdy postupoval, lze datovat pomocí radiouhlíku a odhadnout, jak dlouho uplynulo od doby, kdy se ledovec na daném místě naposledy nevyskytoval.

Ostatní zástupci

K rekonstrukci povrchových teplot na regionální bázi bylo použito několik dalších typů proxy důkazů. Například byly analyzovány útvary uhličitanu vápenatého v jeskyních, jako jsou stalagmity, a vrstevnaté organismy nalezené v mořských jeskyních, zvané *sklerospongy*, pomocí metod podobných těm, které se používají k analýze koster korálů, s cílem získat informace o změnách klimatu v minulosti.

Jak se pro rekonstrukci povrchových teplot používají proxy data?

Znalosti chemických, biologických a/nebo ekologických procesů se používají k řízení odběru vzorků, analýze a převodu přírodních proxy dat na rekonstrukce povrchové teploty. Měření teploty ve vrtech a záznamy o délce ledovců lze převést na časové řady teplot pomocí fyzikálně založených modelů s několika klíčovými proměnnými. U všech ostatních proxy dat použitých pro rekonstrukce diskutované v této zprávě se používají statistické techniky k definování vztahu mezi proxy měřeními a souběžnými instrumentálními teplotními záznamy a tento vztah se pak používá k rekonstrukci minulých teplotních změn ze zbývajících proxy dat. Základní metodika je schematicky znázorněna na obrázku O-1 a podrobněji popsána v následujících odstavcích. Existují rozdíly ve způsobu, jakým jsou tyto metody aplikovány na různé proxy údaje, a rozdíly ve způsobu, jakým tyto metody aplikují různé výzkumné skupiny.



OBRÁZEK O-1 Schéma obecné metodiky používané k rekonstrukci minulého klimatu, včetně rekonstrukce povrchové teploty.

1. *Výběr lokality a sběr dat* - výběr a odběr vzorků konkrétní lokality a proxy, které budou použity pro rekonstrukci. V zásadě by měl být výběr proxy a lokality založen na pochopení fyzikálních, chemických, fyziologických a/nebo ekologických procesů, které určují, jak proxy reaguje na místní podmínky prostředí. V praxi je typ a množství proxy údajů dostupných v dané lokalitě omezené a vztah mezi proxy a klimatickou proměnnou, která nás zajímá, není přesně znám. Výzkumníci se řídí zavedenými technikami sběru a měření vzorků, přičemž hledají lokality, kde jsou proxy záznamy co nejdelší, souvislé a reprezentativní pro cílovou klimatickou proměnnou.

2. *Datování a předzpracování - synchronizace* jednotlivých proxy záznamů tak, aby bylo možné vynést na společnou časovou osu. U letokruhů stromů se datování provádí s přesností na kalendářní rok. Datování korálů, ledových jader a historických dokumentů je často také přesné na rok. Ostatní proxy data mají obvykle nižší časové rozlišení. V této fázi mohou být provedeny úpravy, aby se snížily odchylky v časových řadách zástupných ukazatelů, které jsou

související s neklimatickými faktory. Časové průběhy odvozené z různých vzorků ze stejné oblasti lze také zprůměrovat nebo spojit dohromady a vytvořit tak delší a reprezentativnější proxy záznamy.

3. Kalibrace - *umístění* teplotní stupnice na "proxy teploměr". Tento krok obvykle zahrnuje použití statistické techniky zvané *lineární regrese*. Lze shromáždit údaje o tom, jak proxy teploměry reagují na teplotu v laboratoři nebo v terénu, a v takovém případě lze k rekonstrukci použít statistické testy teoretických nebo empirických omezení. Protože tyto experimentální a monitorovací činnosti nelze provádět pro každý jednotlivý proxy záznam, mnoho rekonstrukcí se spoléhá na lineární regresi, aby se odvodil empirický vztah mezi časovou řadou proxy a povrchovou teplotou v zájmové oblasti. Způsob, jakým je tato metodika použita (např. zda je regrese založena na ročních průměrech, desetiletých průměrech nebo třicetiletých průměrech a zda jsou z dat odstraněny trendy), se v jednotlivých studiích liší.

4. Validace - *testování*, zda empirický vztah odvozený v kroku 3 má měřitelné schopnosti, a kvantitativní hodnocení jeho výkonnosti. Během kalibrace se obvykle části přístrojového záznamu vynechávají. Lineární regresní koeficienty odvozené z kalibrace se pak použijí k rekonstrukci časové řady teplot z proxy dat během tohoto validačního období a rekonstruované teploty se porovnají s odpovídajícím instrumentálním teplotním záznamem. K posouzení dovednosti rekonstrukce během validačního kroku lze použít řadu různých metrik.

5. *Rekonstrukce* - regresní algoritmus vyvinutý v kroku 3 se aplikuje na proxy data, která jsou k dispozici před instrumentálním záznamem, aby se rekonstrukce teploty rozšířila zpět v čase. Chybové úsečky jsou někdy přiřazeny rekonstrukci na základě toho, jak dobře odpovídá pozorovaným změnám povrchové teploty během validačního období v kroku 4. Obecně se šířka chybových úseček v čase mění podle množství a kvality dostupných proxy důkazů. Jak je podrobněji popsáno níže, tyto chybové úsečky nezohledňují všechny nejistoty přítomné v rekonstrukci.

Ačkoli je kalibrace s instrumentálními daty nezbytným krokem ke zjištění, jak dobře proxy údaje odrážejí klima, proxy záznamy nejsou dokonalými teploměry; to znamená, že skutečný vztah mezi proxy a místní povrchovou teplotou není přesně znám. Kromě toho jsou všechny proxy ovlivněny jinými proměnnými než teplotou a může být obtížné tyto rušivé faktory zohlednit. Použití lineární regrese v kalibračním kroku je také problémem, protože rekonstrukce odvozené z lineárních regresních modelů založených na metodě nejmenších čtverců vykazují menší variabilitu než instrumentální záznamy, vůči nimž jsou kalibrovány. Další rozptyl může být ztracen, pokud jednotlivé proxy záznamy v rámci rekonstrukce nejsou správně spojeny dohromady. A konečně, při použití těchto metod se předpokládá, že korelace mezi proxy daty a instrumentálními záznamy se udrží po celé období rekonstrukce, ale tento předpoklad se obtížně testuje.

Rekonstrukce povrchové teploty ve velkém měřítku

Několik rekonstrukcí povrchové teploty provedených od poloviny 90. let 20. století zahrnuje syntézu údajů z mnoha různých míst, často z odlišných zdrojů, jako jsou letokruhy stromů, korály a ledová jádra, s cílem odvodit vzorce teplotních změn v průběhu roku.

Metodika použitá k provedení těchto rekonstrukcí povrchových teplot ve velkém měřítku je v podstatě podobná metodice popsané v předchozí části, ale je upravena následujícím způsobem. V kroku 1 se namísto výběru lokalit pro odběr vzorků vybírá konkrétní soubor zástupných ukazatelů, který se použije jako základ pro rekonstrukci. Rekonstrukce může být založena pouze na jednom druhu proxy nebo na kombinaci několika různých druhů proxy (v takovém případě se označuje jako *multi-proxy* rekonstrukce), které mohly být vzorkovány řadou různých badatelů v různých dobách, aniž by věděli, že jejich data budou použita pro tento účel. Aby bylo dosaženo dostatečného prostorového pokrytí, zahrnují některé rekonstrukce proxy, které mohou být citlivější na srážky než na teplotu, a v takovém případě se k odvození teplotního signálu používají statistické techniky využívající prostorový vztah mezi teplotními a srážkovými poli.

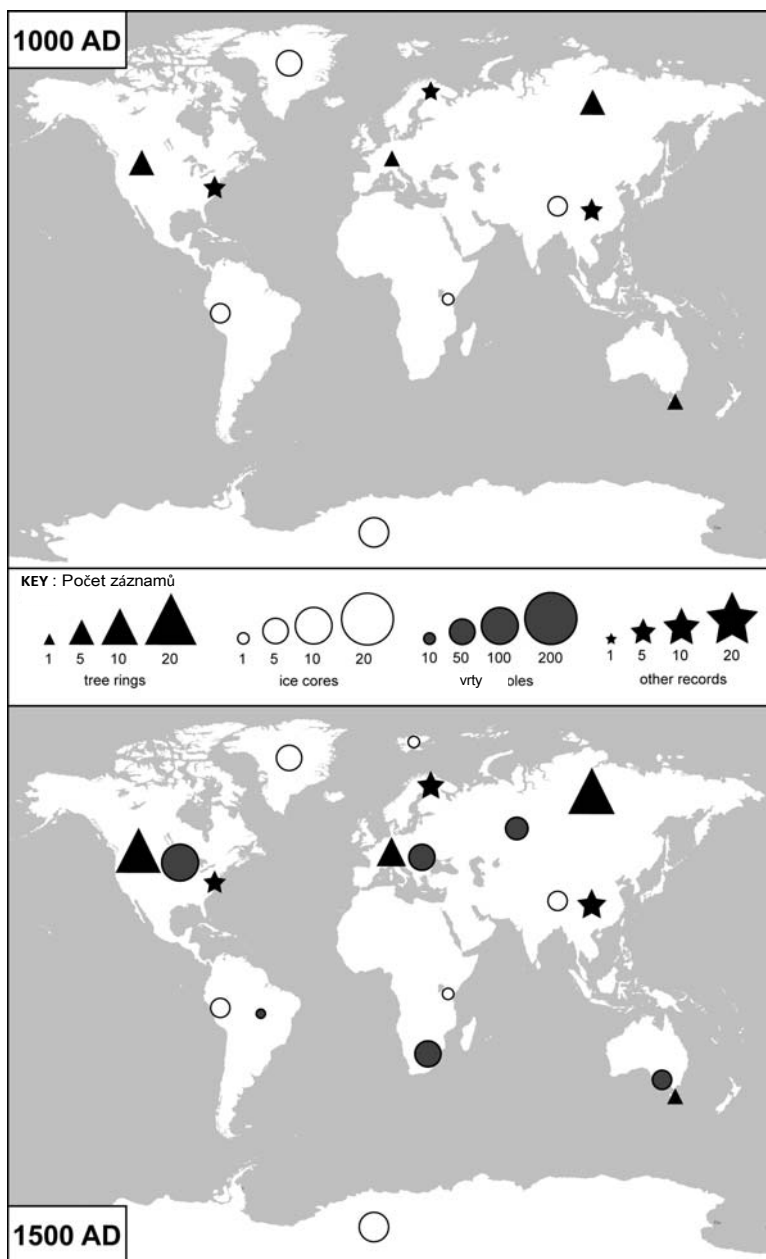
Existují dva obecné přístupy, které se běžně používají k provádění kalibrace, validace a rekonstrukce (kroky 3, 4 a 5 na obrázku O-1) pro velkoplošné rekonstrukce teploty povrchu. V prvním přístupu se proxy kalibrují podle časových řad dominantních vzorců prostorové variability v přístrojovém záznamu teploty a výsledky se kombinují, aby se získala časová řada velkoplošné průměrné teploty. Při druhém přístupu se nejprve složí jednotlivá proxy data a poté se tato řada kalibruje přímo proti časové řadě velkoplošných teplotních variací.

Počet i kvalita proxy záznamů, které jsou k dispozici pro rekonstrukci povrchových teplot, se směrem zpět v čase dramaticky snižuje. V současné době je pro rok 1000 n. l. k dispozici méně než 30 ročně rozlišených časových řad proxy dat; jen velmi málo z nich pochází z jižní polokoule a ještě méně z tropů (obr. O-2). Ačkoliv je pravda, že k určení dlouhodobých (např. stoletých) změn průměrné teploty na polokouli je zapotřebí méně lokalit než pro krátkodobé (např. meziroční) změny, hrubý prostorový výběr vzorků omezuje naši důvěru v odhady průměrné teploty na polokouli nebo globální průměrné teploty před rokem 1600 n. l. a ztěžuje vytváření smysluplných kvantitativních odhadů globálních změn teploty před rokem 900 n. l.. Kromě toho je instrumentální záznam kratší než některé zajímavé charakteristiky předindustriálního období, takže v instrumentálním záznamu je velmi málo statisticky nezávislých informací pro kalibraci a ověření dlouhodobých teplotních rekonstrukcí.

Klimatické modely a klimatický systém

Část přirozené proměnlivosti teploty Země je způsobena procesy probíhajícími v rámci klimatického systému a část je generována vnějšími *vlivy* na klimatický systém. Za posledních 2 000 let mezi tyto vnější vlivy patří sopečné erupce, změny intenzity dopadajícího slunečního záření a změny koncentrací skleníkových plynů. Přímý účinek těchto faktorů na globální průměrnou teplotu zemského povrchu je modifikován přítomností *zpětných vazeb* v podobě tzv.

³Tato zpráva se zaměřuje na rekonstrukce globální průměrné nebo hemisférické průměrné povrchové teploty. Rekonstrukce pro severní polokouli jsou častější, protože počet dostupných proxy záznamů z jižní polokoule je omezený.



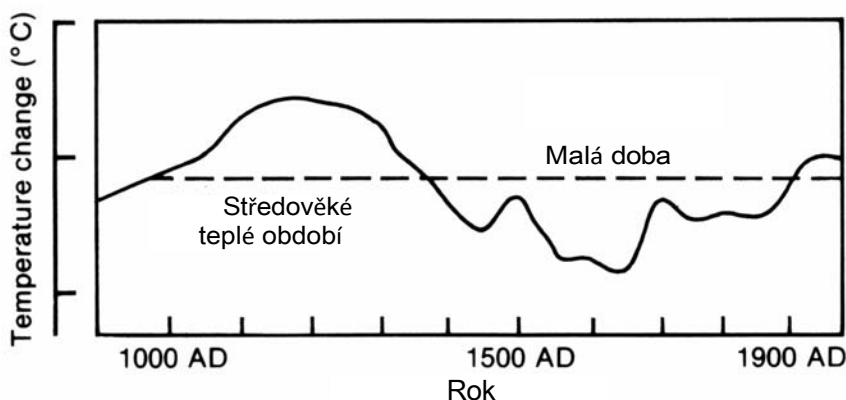
OBRÁZEK O-2 Regionální rozložení záznamů stromových letokruhů, vrtů, ledových jader a "jiných" záznamů použitých k vytvoření velkoplošných rekonstrukcí povrchové teploty na obrázku S-1 (a obrázku O-5) pro (nahore) rok 1000 n. l. a (dole) rok 1500 n. l. "Ostatní záznamy" zahrnují jádra mořských a jezerních sedimentů, jeskynní karbonáty a dokumentární záznamy. Uvedené rozložení je přibližné; například několik jader hlubokomořských sedimentů není uvedeno geograficky. ZDROJ: Údaje z Huang et al. (2000), Mann a Jones (2003a), Esper et al. (2002a) a Moberg et al. (2005a).

klimatického systému, jako je ten, který zahrnuje nárůst vodní páry s rostoucí teplotou. Klimatické modely se často používají k odhadu síly různých zpětných vazeb v klimatickém systému a celkové *citlivosti* globální průměrné teploty zemského povrchu na předepsaný faktor, jako je zdvojnásobení koncentrace oxidu uhličitého v atmosféře.

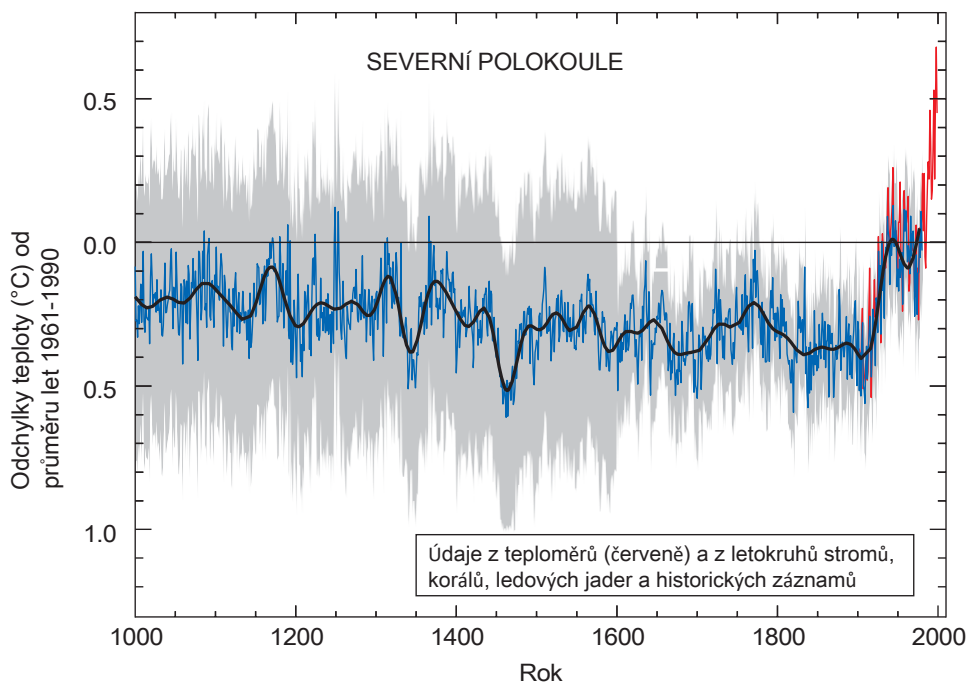
Citlivost klimatu lze také odhadnout pomocí vynucení klimatických modelů pomocí pozorovaných nebo rekonstruovaných vnějších vlivů na klimatický systém v určitém časovém období a porovnáním odezvy modelu s pozorovanou nebo rekonstruovanou povrchovou teplotou ve stejném období. Tuto strategii lze použít pro minulé klimatické změny v časovém rozsahu od několika let (v případě jedné sopečné erupce) až po desítky tisíc let (jako při simulaci doby ledové). Modelování klimatických změn na časové škále posledních 2 000 let je obzvláště náročné, protože vnější vlivy, které působí na této časové škále, jsou relativně malé a nejsou tak dobře známy jako vlivy ve výše uvedených příkladech.

Jaká je naše současná představa o tom, jak se průměrná teplota na polokouli nebo globální průměrná teplota povrchu měnila za posledních 2000 let?

Abychom pochopili současný stav vědeckých poznatků o rekonstrukcích povrchových teplot ve velkém měřítku, je vhodné nejprve shrnout, jak se tyto snahy vyvíjely v posledních několika desetiletích. V kapitole nazvané "Pozorovaná proměnlivost a změna klimatu" IPCC (1990) předložil schematické znázornění globálních teplotních výkyvů od roku 1975 až do roku 900 n. l., které je uvedeno na obrázku O-3. Označení středověké teplé období a malá doba ledová, která se v grafu objevují, odkazují na rysy v evropských a jiných regionálních časových řadách, o nichž se předpokládalo, že vypovídají o globálních průměrných podmínkách. Amplituda teplotních výkyvů od vrcholu k vrcholu byla



OBRÁZEK O-3 Schematický popis kolísání globální teploty ve stupních Celsia za posledních 100 let zveřejněný před více než 15 lety. ZDROJ: IPCC (1990). Přetištěno se svolením; copyright 1990, IPCC.



OBRÁZEK O-4 Multiproxy rekonstrukce změn povrchové teploty na severní polokouli za posledních tisíciletí (modrá), spolu s 50letým průměrem (černá), mírou statistické nejistoty spojené s rekonstrukcí (šedá) a instrumentálními údaji o povrchové teplotě za posledních 150 let (červená), na základě práce Manna et al. (1999). Tento obrázek je někdy označován jako "hokejka". ZDROJ: IPCC (2001). Přetištěno se svolením; copyright 2001, IPCC.

zobrazena v řádu 1 °C. Výrazný trend oteplování, který začal kolem roku 1975, nebyl v grafu vyznačen.

IPCC (2001) uvádí multiproxy rekonstrukci teploty povrchu severní polokoule, která je uvedena na obrázku O-4, včetně chybových úseček. Ve srovnání s předchozím obrázkem byly rekonstruované změny povrchové teploty před 20. stoletím méně výrazné a oteplení ve 20. století bylo dramatičtější díky zahrnutí dat po roce 1975. Na základě výsledků shrnutých na tomto obrázku dospěl IPCC k závěru, že "nárůst teploty ve 20. století byl pravděpodobně⁴ největší ze všech století za posledních 1 000 let. Je také pravděpodobné, že na severní polokouli byla 90. léta 20. století nejteplejším desetiletím a rok 1998 nejteplejším rokem".

⁴MIPCC definuje slovo "pravděpodobný" jako pravděpodobnost 66-90 %, což je více než 2:1. Všimněte si, že to zdaleka nedosahuje vysoké úrovně spolehlivosti (> 95 %), která je považována za standard pro silné kvantitativní argumenty.

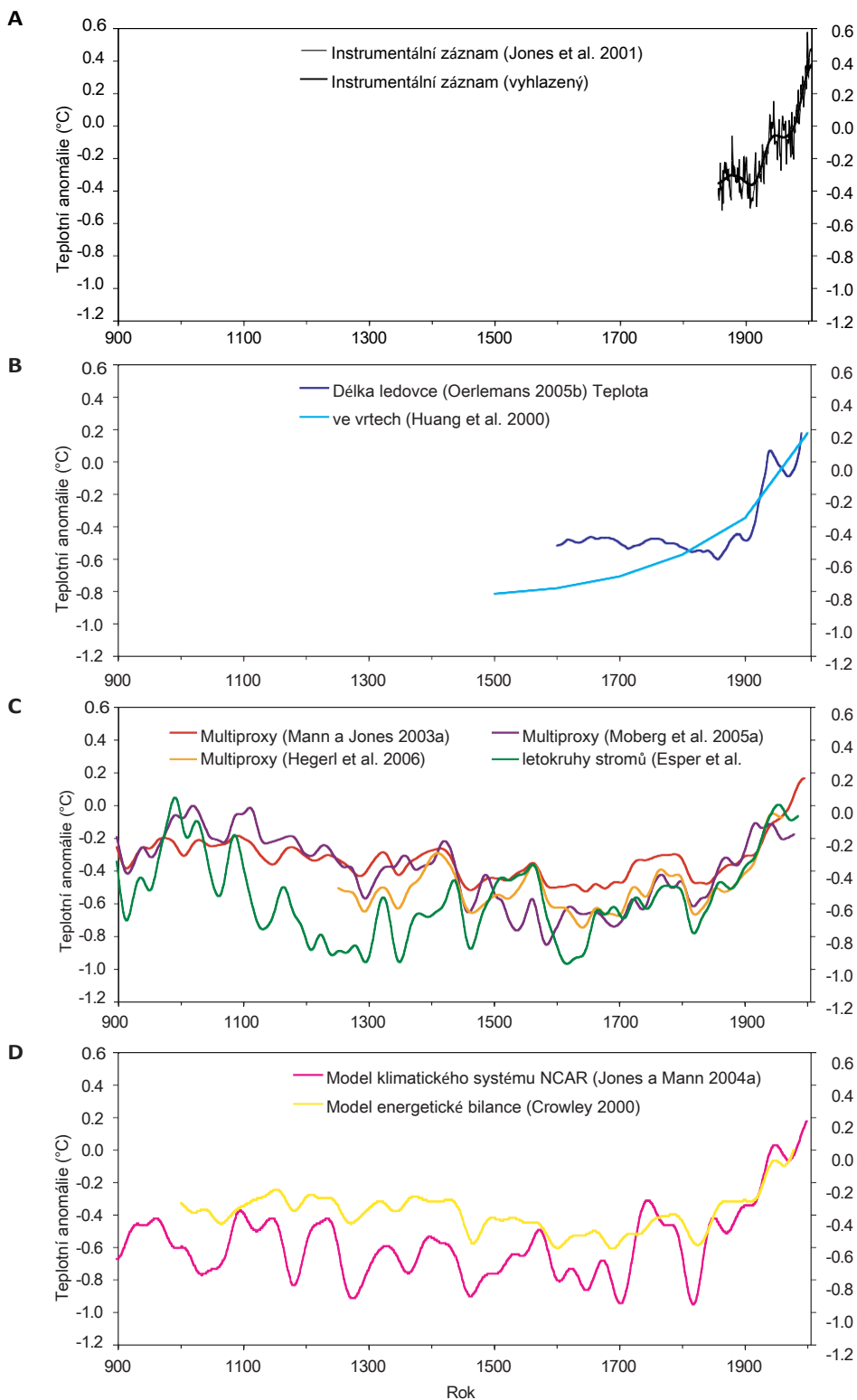
Navzdory širokým chybovým úsečkám byl obrázek O-4 některými nesprávně interpretován jako údaj o existenci jedné "definitivní" rekonstrukce s malou variabilitou mezi stoletími před polovinou 19. století. Je třeba také zdůraznit, že chybové úsečky na tomto konkrétním obrázku a dalších podobných neodrážejí všechny nejistoty, které jsou vlastní rekonstrukcím povrchové teploty ve velkém měřítku na základě proxy dat.

Aktuálnější a úplnější popis toho, co víme o klimatu posledních dvou tisíciletí, lze získat z obrázku O-5, který tento výbor připravil tak, aby zobrazoval instrumentální záznamy sestavené z tradičních teploměrů, několik rozsáhlých rekonstrukcí povrchové teploty založených na různých druzích proxy důkazů a výsledky několika simulací paleoklimatických modelů. Obrázek O-5 má pouze ilustrovat současný stav vědeckých poznatků, nikoliv poskytnout komplexní přehled všech v současnosti dostupných odhadů povrchové teploty ve velkém měřítku.

Přístrojový záznam uvedený na panelu A je sestaven z tradičních údajů teploměrů, které měří teplotu vzduchu těsně nad povrchem země (nebo v případě oceánských bodů teplotu vody těsně pod hladinou oceánu). Panel B ukazuje rekonstrukci globální povrchové teploty na základě změn délky mnoha horských ledovců, které se zmenšují, když se klima otepluje, a rostou, když se klima ochlazuje, a také rekonstrukci globální povrchové teploty na základě měření teploty ve vrtech. Panel C ukazuje kompilaci několika nedávných rekonstrukcí povrchové teploty na severní polokouli založených na multiproxy a stromových letokruzích, z nichž každá byla provedena jinou paleoklimatickou výzkumnou skupinou za použití vlastního výběru proxy a vlastních kalibračních a validačních protokolů. Panel D ukazuje výsledky dvou experimentů s klimatickými modely, které byly vynuceny časově proměnlivými odhady přirozených klimatických vlivů za posledních 1 000 let a antropogenními vlivy od počátku průmyslové revoluce.

Každá z křivek na obrázku O-5 se vyznačuje různými nejistotami a poněkud odlišným geografickým a sezónním důrazem; nelze říci, že by některá z křivek nejlépe odrážela skutečné změny průměrné povrchové teploty na severní polokouli nebo v globálním měřítku za posledních 1 100 let. Rovněž není možné přiřadit jednotlivým rekonstrukcím ani souboru rekonstrukcí chybové čáry, které by odrážely všechny nejistoty spojené s převodem proxy dat na odhady povrchové teploty ve velkém měřítku.

OBRÁZEK O-5 Velkoplošné změny povrchové teploty od roku 900 n. l. odvozené z několika zdrojů. Panel A ukazuje vyhlazené a nevyhlazené verze globálního a ročního průměrného přístrojového záznamu teploty (Jones et al. 2001). Panel B ukazuje globální rekonstrukce povrchových teplot založené na délkových záznamech ledovců (Oerlemans 2005b) a na teplotách z vrtů (Huang et al. 2000). Panel C ukazuje tři multiproxy rekonstrukce (Mann a Jones 2003a, Moberg et al. 2005a a Hegerl et al. 2006) a jednu rekonstrukci průměrné teploty severní polokoule založenou na stromových letokruzích (Esper et al. 2002a, škálovanou podle popisu v Cook et al. 2004). Panel D ukazuje dva odhady kolísání teploty severní polokoule vytvořené modely, které zahrnují sluneční, vulkanické, skleníkové a aerosolové vlivy, jak je popsali Jones a Mann (2004b). Všechny křivky byly vyhlazeny pomocí 40letého dolnopropustného filtru (s výjimkou nevyhlazených přístrojových dat), každá křivka byla vertikálně zarovnána tak, aby měla stejný průměr jako odpovídající přístrojová data během 20. století, a všechny teplotní anomálie jsou vztaženy k průměru přístrojového záznamu z let 1961-1990.



Navzdory těmto omezením rozsáhlý, různorodý a ucelený soubor důkazů, který představují vzorky zobrazené na obrázku O-5, naznačuje, že globální povrchové teploty byly mezi lety 1500 a 1850 (malá doba ledová) relativně chladné a od roku 1900 do současnosti výrazně vzrostly. Rekonstrukce povrchových teplot na základě stromových letokruhů a multiproxy zobrazené v panelu C rovněž naznačují, že severní polokoule byla kolem roku 1000 n. l. relativně teplá, přičemž alespoň jedna rekonstrukce ukazuje povrchové teploty srovnatelné s první polovinou 20. století. Načasování, trvání a amplituda teplých a chladných epizod se liší křivku od křivky a žádná z velkoplošných rekonstrukcí povrchových teplot neukazuje středověké teploty tak teplé jako posledních několik desetiletí 20. století.

Jaké závěry lze vyvodit z velkoplošných rekonstrukcí povrchových teplot?

Na základě svých úvah, grafů znázorněných na obrázku O-5 a důkazů popsaných v následujících kapitolách a na dalších místech dospěl výbor k následujícím závěrům:

- Přístrojově naměřené oteplení o přibližně 0,6 °C během 20. století se odráží také v měření teploty ve vrtech, ústupu ledovců a dalších pozorováních a lze je simulovat pomocí klimatických modelů.
- Velkoplošné rekonstrukce povrchových teplot poskytují obecně konzistentní obraz teplotních trendů v předchozím tisíciletí, včetně relativně teplých podmínek kolem roku 1000 n. l. (některé označované jako "středověké teplé období") a relativně chladného období (nebo "malé doby ledové") kolem roku 1700. Existenci malé doby ledové zhruba od roku 1500 do roku 1850 potvrzuje celá řada důkazů včetně ledových jader, letokruhů stromů, teplot z vrtů, záznamů o délce ledovců a historických dokumentů. Důkazy o regionálním oteplení ve středověku lze nalézt v rozmanitém, ale omezenějším souboru záznamů, včetně ledových jader, letokruhů stromů, mořských sedimentů a historických pramenů z Evropy a Asie, ale přesné načasování a trvání teplých období se mohlo v jednotlivých regionech lišit a velikost a geografický rozsah oteplení jsou nejisté.
- S vysokou mírou jistoty lze říci, že průměrná globální teplota povrchu byla v posledních několika desetiletích 20. století vyšší než v jakémkoli srovnatelném období v předchozích čtyřech stoletích. Toto tvrzení je odůvodněno konzistencí důkazů z široké škály geograficky různorodých zástupných ukazatelů.
- Méně důvěry lze mít v rekonstrukce povrchových teplot ve velkém měřítku pro období od roku 900 do roku 1600 n. l. V současnosti dostupné proxy důkazy naznačují, že teploty na mnoha, ale ne na všech jednotlivých místech byly v posledních 25 letech vyšší než v jakémkoli srovnatelně dlouhém období od roku 900 n. l.. Nejistoty spojené s rekonstrukcí průměrných teplot na polokouli nebo globálních průměrných teplot na základě těchto údajů se výrazně zvyšují zpětně v čase v tomto období a nejsou dosud plně vyčísleny.
- Výrokům o průměrné teplotě na polokouli nebo globální průměrné teplotě povrchu před rokem 900 n. l. lze přisoudit jen velmi malou jistotu, protože pokrytí daty je řídké a nejistoty spojené s proxy daty a metodami používanými k jejich analýze a kombinaci jsou větší než v novějších časových obdobích.

Naše důvěra v platnost velkoplošných rekonstrukcí povrchové teploty je částečně založena na skutečnosti, že jednotlivé řady proxy dat použité k vytvoření těchto rekonstrukcí obecně vykazují silné korelace s místními podmínkami prostředí. Ve většině případů existuje fyzikální, chemický nebo fyziologický důvod, proč proxy odráží místní změny teploty. Naše důvěra je silnější, pokud více nezávislých důkazů ukazuje na stejný výsledek, jako v případě ochlazení v malé době ledové a oteplení ve 20. století.

Ačkoli rekonstrukce založené na teplotních kompozitech z vrtů a záznamech délky ledovce na obrázku O-5 nesahají dostatečně daleko do minulosti, aby mohly poskytnout nezávislou kontrolu rekonstrukcí založených na stromových prstencích a multiproxy pro období před 16. stoletím, existují další důkazy poukazující na jedinečnou povahu nedávného oteplení v kontextu posledního jednoho nebo dvou tisíciletí. Mezi tyto důkazy patří nedávné tání na vrcholcích ledovců na Ellesmerově ostrově a Quelccaya a dalších andských pohořích, rozsáhlý ústup ledovců v pohořích po celém světě (který na některých místech odhalil rozkládající se organickou hmotu, jež pochází z doby daleko před rokem 1000 n. l.), nedávný rozpad ledovcového šelfu Larsen B v Antarktidě a skutečnost, že ledová jádra z Grónska i pobřeží Antarktidy vykazují známky oteplování ve 20. století (zatímco oteplování ve středověku vyazuje pouze Grónsko). Ledová jádra z And a Tibetské náhorní plošiny a ústup ledovcových čepiček na horách v rovníkové Africe, která odrážejí teplotní i hydrologické procesy, rovněž naznačují, že klima 20. století je v kontextu posledních několika tisíc let neobvyklé.

Jaká jsou omezení a silné stránky rekonstrukcí povrchových teplot ve velkém měřítku?

Hlavním důvodem, proč je naše důvěra v rekonstrukce povrchových teplot ve velkém měřítku nižší pro období před rokem 1600 n. l., je relativní nedostatek přesně datovaných proxy důkazů. Mezi další faktory, které omezují naši důvěru v tyto rekonstrukce, patří:

- Relativně krátká délka instrumentálního záznamu (přibližně 150 let) poskytuje pouze několik nezávislých informací, které umožňují kalibraci a ověření rekonstrukcí povrchové teploty ve velkém prostorovém měřítku a v časových obdobích několika desetiletí. Přístrojové záznamy používané pro kalibraci a validaci proxy dat byly navíc shromážděny v období, kdy se výrazně zvýšily jak průměrné globální teploty, tak i dopady lidské činnosti na životní prostředí.
- Přestože se při výběru, analýze a interpretaci proxy dat postupuje opatrně, vždy existuje možnost, že se vztah mezi proxy a místní povrchovou teplotou mohl v průběhu času měnit. Většina zástupných ukazatelů je citlivá na teplotu pouze v určitém ročním období a zástupný ukazatel může odrážet změny teploty v časovém měřítku delším, než je kalibrační období.
- Vzhledem k tomu, že neexistuje shoda ohledně toho, které metody nebo statistické vzorce jsou pro kalibraci a validaci těchto rekonstrukcí nejvhodnější, přispívají k rozdílným mezi nimi i různá rozhodnutí různých badatelů a výzkumných skupin. V některých případech se na tom podílí i volba, zda do rekonstrukce zahrnout jeden nebo více proxy záznamů.

- Spolehlivost časových řad teplot ve velkém měřítku odvozených z pozorování na malém počtu míst a s různou úrovní chronologické přesnosti není dosud vyřešena. Panuje všeobecná shoda, že pro definování výkyvů mezi stoletími je zapotřebí menšího počtu lokalit než pro výkyvy mezi jednotlivými roky, ale chyby v rekonstrukcích, které lze konkrétně přičíst omezenému prostorovému výběru vzorků, je obtížné kvantifikovat.

Výbor označil za hlavní přednosti velkoplošných rekonstrukcí povrchové teploty:

- Proxy záznamy jsou smysluplnými záznamníky proměnných prostředí. Tyto záznamy jsou vybírány a vzorkovány na základě stanovených kritérií a vazby mezi proxy záznamy a environmentálními proměnnými jsou dobře zdůvodněny z hlediska fyzikálních, chemických a biologických procesů.

- Stromové letokruhy, které jsou dominantním zdrojem dat v mnoha velkoplošných rekonstrukcích povrchové teploty, jsou odvozeny z regionálních sítí s rozsáhlou replikací, které odrážejí variabilitu teploty v regionálním měřítku.

- Většina rekonstrukcí povrchové teploty zahrnuje proxy důkazy z různých zdrojů a rozsáhlých zeměpisných oblastí a výsledné odhady teploty jsou často robustní s ohledem na odstranění jednotlivých záznamů.

- Z různých rekonstrukcí vyplývají stejné obecné teplotní trendy. Některé rekonstrukce se zaměřují na stromy citlivé na teplotu, jiné na geochemické a sedimentární proxy a další odvozují teplotní signál využitím prostorového vztahu mezi teplotními a srážkovými poli.

Naše celková důvěra v obecný charakter rekonstrukcí pro období od roku 1600 n. l. je vysoká, protože různé rekonstrukce založené na různých typech proxy důkazů, různém výběru proxy dat daného typu a různých metodikách poskytují podobné výsledky. Naše důvěra v tvrzení týkající se toho, jak se teplota mohla měnit před rokem 1600, a zejména pokud jde o oteplení severní polokoule ve středověku ve srovnání s oteplením v posledních několika desetiletích, je nižší kvůli omezenému množství dostupných proxy důkazů a nejistotám při rekonstrukci velkoplošné průměrné teploty z takto omezených souborů dat.

Základním závěrem Manna et al. (1998, 1999) bylo, že oteplení na konci 20. století na severní polokouli nemělo v posledních 1000 letech obdoby. Tento závěr byl následně podpořen celou řadou důkazů, které zahrnují jak další velkoplošné rekonstrukce povrchových teplot, tak i proklamované změny v řadě lokálních proxy indikátorů, jako je tání ledovců a ústup ledovců po celém světě. Ne všechny jednotlivé proxy záznamy naznačují, že nedávné oteplení je bezprecedentní, ačkoli větší část geograficky rozdělených lokalit zažila koncem 20. století výjimečné oteplení než v jakémkoli jiném delším období od roku 900 n. l. V tomto období se však oteplení projevilo i v jiných oblastech.

Na základě analýz uvedených v původních článcích Manna a kol. a těchto novějších podpůrných důkazů považuje výbor za pravděpodobné, že severní polokoule byla v posledních desetiletích 20. století teplejší než v jakémkoli srovnatelném období v předchozím tisíciletí. Značné nejistoty, které v současné době panují při kvantitativním hodnocení velkoplošných změn povrchové teploty před rokem 1600 n. l., snižují naši důvěru v tento závěr ve srovnání s vysokým

míra důvěry, kterou přikládáme ochlazení v malé době ledové a oteplení ve 20. století. Ještě menší důvěru lze mít k původním závěrům Manna et al. (1999), že "devadesátá léta jsou pravděpodobně nejteplejším desetiletím a rok 1998 nejteplejším rokem přinejmenším za celé tisíciletí", protože nejistoty spojené s rekonstrukcí teploty pro jednotlivé roky a desetiletí jsou větší než nejistoty pro delší časové úseky a protože ne všechny dostupné zástupné údaje zaznamenávají informace o teplotě v tak krátkém časovém období.

Co nám klimatické modely a odhady vlivů říkají o posledních 2000 letech?

Na základě satelitního monitorování, které začalo koncem 70. let 20. století, je zřejmé, že rychlé globální oteplování v posledních několika desetiletích nelze přičítat zvýšenému slunečnímu záření. Měření ukazují, že sluneční emise se během tohoto období výrazně nezměnila, s výjimkou malých výkyvů v souvislosti s jedenáctiletým cyklem slunečních skvrn. Zda jsou výkyvy v jasnosti Slunce v delších časových intervalech dostatečně velké na to, aby představovaly významný klimatický faktor, je stále předmětem diskuse. Byla vyslovena hypotéza, že snížené sluneční záření během takzvaného Maunderova minima v pozorování slunečních skvrn v letech 1645 až 1715 mohlo přispět k chladnému období malé doby ledové.

Je známo, že síranové aerosoly vznikající z plynů vhaněných do stratosféry během velkých sopečných erupcí zvyšují podíl dopadajícího slunečního záření odraženého zpět do vesmíru, čímž ochlazují spodní vrstvy atmosféry a nejsvrchnější vrstvy oceánu. Přestože se většina částic během jednoho nebo dvou let ze stratosféry usadí, ochlazování přetrvává, protože oceánu trvá několik let, než se ochladí, a deset let nebo déle, než se opět ohřeje. Proxy důkazy naznačují, že období kolem

1000 n. l., během něhož jsou v mnoha proxy záznamech patrné teplé intervaly, odpovídal delšímu intervalu nízké vulkanické aktivity, kdy příchozímu slunečnímu záření relativně nebránila přítomnost stratosférických aerosolů. Rekonstrukce teplot a vnějších vlivů v období 2 000 let před začátkem průmyslové revoluce zatím nejsou dostatečně přesné, aby mohly být definitivně ověřeny citlivosti klimatu odvozené z klimatických modelů, a to především proto, že vnější vlivy v tomto časovém měřítku (především proměnlivost slunečního záření a kolísání sopečné činnosti) nejsou příliš dobře známy. Simulace klimatických modelů vynucené odhady toho, jak se v tomto časovém období mohly měnit sluneční emise, sopečná činnost a další přírodní forcinky, však v zásadě odpovídají povrchovým teplotám, které se v tomto období měnily. (viz panel D na obrázku O-5).

Jak zásadní význam mají rekonstrukce povrchových teplot ve velkém měřítku pro naše chápání globálních změn klimatu?

Rekonstrukce povrchové teploty mohou poskytnout nezávislé informace o citlivosti klimatu a o přirozené proměnlivosti klimatického systému, které lze porovnat s odhady založenými na teoretických výpočtech a klimatických modelech, jakož i s dalšími empirickými údaji. Velkoplošné rekonstrukce povrchových teplot za posledních 2 000 let však nejsou hlavním důkazem pro všeobecně přijímané názory, že dochází ke globálnímu oteplování, že k tomuto oteplování alespoň částečně přispívá lidská činnost a že se Země bude v příštím století nadále oteplovat. Mezi hlavní důkazy pro tyto závěry (viz např. NRC 2001) patří např:

- měření, která od poloviny 19. století ukazují velký nárůst oxidu uhličitého a dalších skleníkových plynů,
- instrumentální měření vzestupných teplotních trendů a souběžných změn řady zástupných ukazatelů za poslední století,
- jednoduché výpočty přenosu záření pro ovlivnění spojené s rostoucími koncentracemi skleníkových plynů spolu s rozumnými předpoklady o znaménku a velikosti zpětných klimatických vazeb a
- numerické experimenty prováděné s nejmodernějšími klimatickými modely.

Podpůrné důkazy zahrnují:

- Pozorované globální ochlazení v reakci na sopečné erupce je v souladu s odhady citlivosti založenými na klimatických modelech.
- Proxy důkazy týkající se ochlazení atmosféry v reakci na zvýšení ledového pokryvu a snížení koncentrace oxidu uhličitého v atmosféře v době posledního glaciálního maxima jsou v souladu s odhady citlivosti založenými na klimatických modelech.
- Dokumentace, že nedávné oteplování bylo téměř celosvětovým jevem.
- Stratosféra se ochladila a oceány se oteplily způsobem, který odpovídá předpokládanému prostorovému a časovému průběhu skleníkového oteplování.

Rekonstrukce povrchových teplot za posledních 2 000 let jsou v souladu s dalšími důkazy globálních klimatických změn a lze je považovat za další podpůrné důkazy. Zejména četné náznaky, že nedávné oteplení nemá obdoby přinejmenším za posledních 400 let a možná i za posledních několik tisíciletí, v kombinaci s odhady změn vnějších klimatických vlivů za stejné období podporují závěr, že za většinu nedávného oteplení je zodpovědná lidská činnost. Nejistoty v rekonstrukcích povrchové teploty a vnějších vlivů pro období před instrumentálním záznamem však činí tyto důkazy méně průkaznými než ostatní výše uvedené důkazy. Je třeba také poznamenat, že vědecký konsenzus ohledně globálního oteplování způsobeného člověkem by se podstatně nezměnil, kdyby se například zjistilo, že průměrná globální teplota povrchu před 1 000 lety byla stejně teplá jako dnes.

Jaký význam má výměna informací a údajů?

Shromažďování, sestavování a kalibrace paleoklimatických dat představuje značnou časovou a finanční investici, na níž se často podílejí velké týmy vědeckých pracovníků. Výbor si uvědomuje, že přístup k výzkumným datům je komplikovaná, oborově hluboká záležitost a že přístup k počítačovým modelům a metodám je obzvláště náročný, protože je třeba zohlednit práva duševního vlastnictví. Podle našeho názoru je pro veškerý výzkum přínosem plný a otevřený přístup k publikovaným souborům dat a jasné vysvětlení analytických metod je povinné. Kolegové by měli mít přístup k informacím potřebným k reprodukci publikovaných výsledků, aby se zvýšila důvěra ve výsledek studie uvnitř i vně vědecké komunity. Další výbory

a organizace vytvořily rozsáhlou literaturu o významu otevřeného přístupu k vědeckým datům a o souvisejících pokynech pro archivaci dat a přístup k nim (např. NRC 1995). Výzkumu paleoklimatu by prospělo, kdyby jednotliví výzkumní pracovníci, odborné společnosti, vydavatelé časopisů a financující agentury nadále zlepšovali své úsilí o zajištění dodržování těchto stávajících postupů otevřeného přístupu.

Výzkumníci kroužků stromů si uvědomují důležitost archivace dat od roku 1974, kdy byla založena Mezinárodní banka dat o kroužcích stromů, která slouží jako trvalé úložiště dat o kroužcích stromů (měření, chronologie a odvozené rekonstrukce). Jejich fondy jsou k dispozici online prostřednictvím Světového datového centra pro paleoklimatologii, stejně jako řada dalších proxy dat z ledových jader, korálů, vrtů, jezerních a oceánských sedimentů, jeskyní a biologických indikátorů. Vzhledem k tomu, že soubory proxy dat jsou stále častěji dostupné na webu, mají všichni výzkumníci možnost analyzovat data, testovat metody a poskytovat vlastní interpretaci existujících důkazů prostřednictvím uznávaných, recenzovaných vědeckých zdrojů.

Co by se dalo udělat pro lepší pochopení změn klimatu za posledních 2000 let?

Rekonstrukce povrchové teploty mají potenciál dále zlepšit naše znalosti o kolísání teploty za posledních 2 000 let, zejména pokud se podaří identifikovat a získat další proxy důkazy. Zvláště cenné by byly další proxy údaje, které zaznamenávají desetileté až stoleté klimatické změny, zejména pro období 1-1600 n. l. V případě, že by se tyto údaje objevily, bylo by možné je využít k rekonstrukci teploty. Nové údaje z jižní polokoule, tropů a oceánů by zvýšily naši důvěru v rekonstrukce globální teploty, zatímco další údaje z oblastí, které již byly vzorkovány, by pomohly snížit nejistoty spojené se současnými rekonstrukcemi. Kromě toho bylo mnoho stávajících proxy záznamů shromážděno před desítkami let a je třeba je aktualizovat, aby bylo možné provádět spolehlivější srovnání s přístrojovými záznamy. Lepší pokrytí daty by také umožnilo testovat, zda změny teploty v minulosti měly stejný průběh jako oteplování v minulém století.

Nové metody nebo pečlivější využití stávajících metod mohou také pomoci obejít některá stávající omezení rekonstrukcí povrchové teploty ve velkém měřítku na základě více zástupných ukazatelů. Každá jednotlivá proxy poskytuje záznam o změnách prostředí, ale proces kombinování těchto signálů do prostorově zprůměrovaného teplotního signálu vyžaduje pečlivé statistické vyhodnocení. Některá omezení spojená s těmito rekonstrukcemi by bylo možné obejít použitím řady doplňkových strategií při analýze proxy dat, včetně jejich využití k omezení klimatických modelů, a pokusem o kalibraci proxy dat vůči klimatickým proměnným různými způsoby.

A konečně, některé z nejdůležitějších důsledků změny klimatu jsou spojeny se změnami srážek, zejména s četností a intenzitou sucha a povodní, na rozdíl od samotné teploty. Zajímavé jsou také změny regionálních cirkulačních vzorců, sněhových srážek, hurikánové aktivity a dalších klimatických prvků v čase. Proto by bylo cenné vidět regionální i velkoplošné rekonstrukce změn srážek a dalších klimatických proměnných za posledních 2 000 let, které by doplnily rekonstrukce provedené pro teplotu. Úsilí o zlepšení spolehlivosti rekonstrukcí povrchové teploty je třeba doplnit také snahou o lepší pochopení vlivů, které přispěly k proměnlivosti klimatu za posledních 2 000 let.

Paleoklimatické rekonstrukce nám při analýze ve spojení s historickými a archeologickými důkazy mohou také napovědět, jak se minulé společnosti přizpůsobovaly změnám klimatu. Tato oblast výzkumu postupuje kupředu: hypotézy se testují, metody se zdokonalují a objevují se nové myšlenky.

1

Úvod do technických kapitol

Teplota Země se mění v různých časových intervalech a z různých důvodů. Proměnlivost v měřítku 10 000-100 000 let je dána cyklickými změnami oběžné dráhy Země, ale silně závisí na vnitřním fungování klimatického systému a jeho propojení s dalšími proměnnými prostředí. Chladnější doby ledové se vyznačují sníženou koncentrací skleníkových plynů v atmosféře, které slouží k zesílení ochlazování na zemském povrchu, což vede k teplotním výkyvům v řádu 5 °C mezi dobami ledovými a teplejšími dobami meziledovými, jako je ta současná (Hansen 2004). Za posledních 2 000 let byly změny na oběžné dráze Země malé (Lean 2005a). Změny koncentrace skleníkových plynů v atmosféře byly v tomto období před nástupem vlivu člověka v 19. století také velmi malé (Joos 2005).

Velmi zajímavá je tedy otázka, jak se měnila průměrná globální povrchová teplota za posledních 2 000 let. Pokud se analyzují ve spojení s rekonstrukcemi sluneční variability, sopečné činnosti a dalších vlivů na klima v tomto období, mohou být rekonstrukce povrchové teploty užitečné při snaze snížit míru nejistoty v prognózách skleníkového oteplování způsobeného člověkem. Takové rekonstrukce poskytují měřítko přirozené proměnlivosti klimatického systému, s nímž lze porovnávat projekce globálního oteplování způsobeného člověkem. Tato kapitola popisuje, jak velkoplošné rekonstrukce povrchové teploty přispívají k našemu pochopení citlivosti globální průměrné teploty na přirozené a člověkem způsobené poruchy energetické bilance Země. Nabízí také pohled na význam rekonstrukcí povrchových teplot ve srovnání s jinými druhy důkazů při posuzování míry, do jaké lze oteplování na konci 20. století přičíst lidské činnosti.

POJMY A DEFINICE

Tato zpráva se zaměřuje na rekonstrukce povrchových teplot ve velkém geografickém měřítku, zejména na globální průměrné teploty a průměrné teploty na polokoulích. Globální průměrná povrchová teplota je obzvláště dobrým ukazatelem stavu klimatického systému, protože je to

úzce souvisí s rovnováhou mezi přicházející a odcházející energií v horní části atmosféry.

Globální průměrná povrchová teplota se mění v závislosti na událostech mimo klimatický systém, které ovlivňují globální energetickou bilanci (NRC 2005). Za nejdůležitější *vnější vlivy* na klima v posledních 2000 letech jsou považovány změny koncentrace oxidu uhličitého a dalších skleníkových plynů v atmosféře, koncentrace aerosolů, sopečná činnost a sluneční záření. Změny ve využívání půdy (kácení lesů, zvyšování rozlohy obdělávané půdy a rozšiřování pouští) mohou také přispívat k proměnlivosti klimatu, ale jejich vliv je obtížné kvantifikovat (Ruddiman 2003). Lidská činnost způsobila zvýšení koncentrace skleníkových plynů a aerosolů v atmosféře, které se poprvé projevilo v 19. století.

Klimatický systém také vykazuje *vnitřní proměnlivost*, která by se projevila i bez vnějších vlivů. Známým příkladem vnitřní proměnlivosti klimatu v ročním měřítku je jev El Niño, který je důsledkem interakcí mezi tropickým Tichým oceánem a globální atmosférou. Interakce mezi masivnějšími, pomalu se měnícími složkami klimatického systému by mohly vést ke vzniku vnitřní proměnlivosti klimatického systému v časovém měřítku desítek až stovek let, která může být do značné míry nesouvisející s vnějšími vlivy v tomto časovém měřítku.

Změna globální průměrné teploty vzduchu při povrchu, která nastane v reakci na trvalý vnější vliv o síle 1 wattu na metr čtvereční na zemském povrchu, je definována jako *citlivost* klimatického systému (NRC 2003a). Alternativní jednotkou, která se v této zprávě hojně používá, je nárůst teploty (ve °C), k němuž by došlo v reakci na zdvojnásobení předindustriální koncentrace oxidu uhličitého v atmosféře. Citlivost klimatu je dána fyzikálními zákony a lze ji odhadnout pomocí metod popsaných v následující části. Kolísání globální průměrné teploty povrchu, ke kterému došlo v reakci na přírodní vlivy v minulosti, poskytuje kontrolu odhadu citlivosti klimatu. Při zachování ostatních podmínek platí, že čím vyšší je citlivost, tím větší budoucí oteplení lze očekávat v reakci na budoucí skleníkové vlivy. Sílu různých vnějších vlivů lze kvantifikovat a porovnávat; poznatky získané na základě pochopení reakce na jeden druh vlivu jsou použitelné pro předpověď reakce na jiné druhy vlivu.

Stejně jako u jiných fyzikálních systémů svědčí vysoká citlivost klimatu o převaze pozitivních klimatických zpětných vazeb (NRC 2003a). Nejdůležitější pozitivní zpětná vazba v klimatickém systému zahrnuje zvýšení koncentrace vodní páry v atmosféře při oteplování Země. Změny koncentrací vodní páry, která je sama o sobě skleníkovým plynem, zesilují oteplování nebo ochlazování, k němuž dochází v reakci na změny koncentrací ostatních skleníkových plynů. Další pozitivní zpětná vazba zahrnuje pokles podílu plochy pokryté sněhem a ledem při oteplování, což snižuje odrazivost Země jako celku. Další zpětné vazby zahrnují změny oblačnosti, rychlosti lapse, atmosférické cirkulace a vlastností zemského povrchu při oteplování nebo ochlazování Země. Kombinovaný účinek různých pozitivních a negativních zpětných vazeb určuje citlivost klimatického systému a citlivost zase určuje, o kolik se Země oteplí v reakci na předepsané zvýšení koncentrace oxidu uhličitého v atmosféře nebo na změny jiných vnějších faktorů.

Odhad citlivosti klimatu

Citlivost klimatického systému lze odhadnout několika různými způsoby. Přímá odezva na zdvojnásobení předindustriální koncentrace oxidu uhličitého v atmosféře

trace, která by byla pozorována při absenci zpětné vazby, se na základě výpočtů přenosu záření odhaduje na přibližně 1 °C a zpětná vazba vodní páry (vypočtená za předpokladu konstantní relativní vlhkosti) tuto odezvu téměř zdvojnásobuje (např. Held a Soden 2000). Numerické experimenty prováděné s různými klimatickými modely, které zahrnují celý soubor klimatických zpětných vazeb, poskytují řadu citlivostí klimatu. Nejméně citlivé modely vykazují citlivost zhruba srovnatelnou s citlivostí, které by bylo dosaženo, kdyby byla zahrnuta pouze zpětná vazba vodní páry (asi 2 °C při zdvojnásobení oxidu uhličitého), zatímco nejcitlivější modely odhadují citlivost pětikrát větší než výpočty přenosu záření (Goosse et al. 2005, Webb et al. 2006, Winton 2006). Modely středního rozsahu odhadují citlivost klimatu na zdvojnásobení oxidu uhličitého na přibližně 3 °C.

Odhady citlivosti odvozené z modelů se ověřují porovnáním zjištěných a simulovaných reakcí na různé známé vnější vlivy. Například modelové simulace, které berou v úvahu rekonstrukce povrchových teplot za posledních 700 let v kombinaci s instrumentálními daty, odhadují citlivost klimatu na 1,5 až 6,2 °C (Hegerl et al. 2006).

PŘISUZOVÁNÍ GLOBÁLNÍHO OTEPLOVÁNÍ LIDSKÝM VLIVŮM.

Přisuzování rozsáhlého oteplování na konci 20. století lidským vlivům je částečně podpořeno důkazy o tom, že oteplení v posledních jednom nebo dvou desetiletích vyniká nad pozadím nebo přirozenou proměnlivostí posledních 2 000 let. Abychom tento paleoklimatický důkaz zasadili do kontextu, je třeba vzít v úvahu další důkazy, na nichž je toto přisuzování založeno.

Na základě důkazů shrnutých v kapitole 2 je známo, že průměrná globální teplota povrchu se během minulého století zvýšila přibližně o 0,6 °C a že k většině tohoto oteplení došlo v období 1920-1940 a v posledních 30 letech. Troposféra se otepluje rychlostí, která odpovídá oteplování zemského povrchu (CCSP a SGR 2006). Prostorový vzorec pozorovaných teplotních trendů se podobá "otisku" skleníkového oteplování v klimatických modelech, s ochlazováním ve stratosféře a pohlcováním tepla oceány (např. Meehl et al. 2004, Hansen et al. 2005, Barnett et al. 2005). Oteplování se odráží i v řadě dalších ukazatelů: Například ledovce ustupují, věčně zmrzlá půda taje, sněhová pokrývka se zmenšuje, arktický mořský led se ztenčuje, řeky a jezera tají dříve a zamrzají později, mění se termíny migrace a hnízdění ptáků, květiny kvetou dříve a areály mnoha druhů hmyzu a rostlin se rozšiřují do vyšších zeměpisných šířek a nadmořských výšek (např. ACIA 2004, Parmesan a Yohe 2003, Root et al. 2003, Berteaux et al. 2004, Bradshaw a Holzapfel 2006).

Je také dobře známo, že koncentrace skleníkových plynů v atmosféře se v důsledku lidské činnosti zvyšuje. V posledních desetiletích bylo toto zvyšování dokumentováno na základě přímých měření na síti stanic. Nárůst koncentrací oxidu uhličitého, metanu a oxidu dusného počínaje 19. stoletím, který následoval po mnoha tisíciletích téměř konstantních koncentrací, je jasně patrný ve vzduchových bublinách zachycených v ledových jádrech získaných z grónského a antarktického ledovce (Petit et al. 1999, Siegenthaler et al. 2005a, Spahni et al. 2005). Přisuzování tohoto nárůstu lidským činnostem se opírá jak o izotopové důkazy, tak o skutečnost, že je v souladu s inventarizací emisí těchto plynů ze spalování fosilních paliv a dalších lidských činností, přičemž se bere v úvahu ukládání v oceánech a suchozemské biosféře. Na základě měření na stanicích a v ledových jádrech se kombinované údaje

způsobené skleníkovými plyny vnášenými do atmosféry lidskou činností je přibližně 2,5 wattu na metr čtvereční (IPCC 2001).

Na základě citlivosti klimatu na zdvojnásobení oxidu uhličitého o 3 °C, jak bylo odhadnuto v předchozí části, stačí skleníkový efekt 2,5 wattu na metr čtvereční k oteplení o přibližně 2 °C. Pozorované oteplení během 20. století o přibližně 0,6 °C je nižší než odhadovaná reakce na skleníkový efekt ze dvou důvodů:

- je částečně kompenzován nárůstem koncentrace síranů a dalších aerosolů, které mají tendenci způsobovat ochlazování na zemském povrchu (např. Santer et al. 1995), a
- část oteplení se zatím neprojevila, protože oceány a polární ledové příkrovy neměly dostatek času na to, aby se vyrovnaly s působícími vlivy (např. Hansen et al. 2005).

Pozorované oteplení o 0,6 °C během 20. století je mnohem větší než vnitřní variabilita klimatických modelů. Modelové simulace, které zahrnují jak externě vynucenou, tak vnitřní variabilitu, včetně věrohodných předpokladů časově proměnlivých sulfátových aerosolů, poskytují časové řady globální průměrné teploty, které se podobají pozorováním (Stott et al. 2000, Ammann et al. 2003). V míře, v jaké oteplení v posledním jednom či dvou desetiletích vyniká nad přirozenou variabilitu průměrné teploty povrchu za posledních 2 000 let, slouží záznam povrchové teploty jako podpůrný důkaz, že za oteplení v poslední době je z velké části odpovědná lidská činnost. Přisuzování nedávného globálního oteplování lidským aktivitám však nespočívá pouze nebo dokonce především na paleoklimatických důkazech.

STRUKTURA ZPRÁVY

V další kapitole této zprávy je uveden stručný popis přístrojových záznamů a některé úvahy, které se vztahují k odhadu velkoplošných změn povrchové teploty na základě pozorování na omezeném počtu míst. Většina toho, co víme o tom, jak se teplota Země měnila v časovém měřítku posledních 2 000 let, je založena na *proxy záznamech*, včetně dokumentárních záznamů, archeologických důkazů a různých přírodních zdrojů včetně letokruhů stromů, korálů, ledových jader, oceánských a jezerních sedimentů, teplot z vrtů a záznamů délky ledovců. Zdroje a charakteristiky různých souborů proxy dat jsou popsány v kapitolách 3 - 4.

8. Statistické postupy a předpoklady, které se používají při rekonstrukci povrchových teplot z proxy dat, jsou popsány v kapitole 9. Paleoklimatické modely a rozšířená diskuse o změnách klimatických vlivů v posledních dvou tisíciletích jsou uvedeny v kapitole 10. A konečně kapitola 11 popisuje syntézu důkazů získaných z různých proxy dat, která slouží k vytvoření velkoplošných rekonstrukcí povrchových teplot. Tyto techniky byly předmětem polemik v řadě nedávných prací v odborné literatuře, proto kapitola 11 také hodnotí jejich silné stránky, omezení a vyhlídky na zlepšení.

2

Instrumentální záznam

- Odhady globální průměrné teploty založené na přístrojových záznamech naznačují téměř vyrovnaný trend od roku 1856 do roku 1910, vzestup do roku 1945, mírný pokles do roku 1975 a vzestup do současnosti. Celkový nárůst během 20. století činil přibližně 0,6 °C, přičemž k největšímu oteplení došlo v pevninských oblastech na pólech od 30° s. š.
- Přístrojové záznamy o teplotě jsou na některých místech starší než 250 let, ale teprve od konce 19. století existuje dostatečný počet pozorovacích stanic pro odhad průměrné teploty na severní polokouli nebo na celé zeměkouli.
- Kombinace přístrojových záznamů pro výpočet velkoplošných povrchových teplot vyžaduje zahrnutí dostatečného počtu přístrojových lokalit s širokým geografickým rozložením, aby bylo možné získat reprezentativní odhad. Tropická měření jsou pro odhad velkoplošných teplot obzvláště užitečná, protože mají tendenci lépe sledovat globální průměrné změny.

Většina rekonstrukcí povrchové teploty je nějakým způsobem závislá na přístrojovém záznamu povrchové teploty. Individuální a multiproxy rekonstrukce založené na ročně nebo sezónně rozlišovaných proxy datech využívají tento záznam ke kalibraci i validaci. Jiné typy rekonstrukcí - například rekonstrukce odvozené z délky ledovců a měření z vrtů - implicitně využívají místní instrumentální záznamy, které pomáhají vyvinout fyzikální model používaný k přeměně proxy záznamu na teplotní záznam. Proto je užitečné stručně popsat instrumentální záznamy a diskutovat o jejich vlastnostech a nejistotách předtím, než se budeme zabývat způsobem, jakým jsou využívány při rekonstrukcích povrchové teploty.

PŘÍSTROJOVÁ DATA

Přístrojový záznam povrchové teploty ("přístrojový záznam") je odvozen z tradičních měření teploměrem a je základem pro vytváření odhadů povrchové teploty ve velkém měřítku (globální průměr nebo průměr polokoule), které se používají ve studiích změny klimatu. Globální průměrná teplota se vytváří jako kombinace teplot vzduchu při povrchu pevniny a teplot mořské vody při povrchu (neboli teploty povrchu moře [SST]) pro oceány. Teploty vzduchu na pevnině jsou měřeny teploměry umístěnými v přístřešcích ve výšce asi 1,5 metru nad zemským povrchem nebo výše v oblastech, kde může být značná sněhová pokrývka. Pro globální kompilace uvedené v této kapitole hlásí teploty vzduchu na pevnině přibližně 2 000 stanic. Stanice nejsou prostorově rozmístěny tak, aby monitorovaly všechny suchozemské oblasti se stejnou hustotou; neobydlené a nezastavěné oblasti měly vždy tendenci mít slabé pokrytí.

SST se měří pomocí lodí, bójí, bathytermografů a od roku 1981 také pomocí satelitů. Lodě obvykle měří teplotu vody jedním ze tří způsobů: kbelíky (nejstarší metoda), čidly na trupu a vodou nasávanou k chlazení motorů (vstříkovací teploty). Hloubka měření na lodích se pohybuje od 1 do 15 metrů. Bóje jsou standardizovanější a hlásí teploty zpravidla v hloubce 1 metr a v několika dalších hloubkách v závislosti na typu bóje.

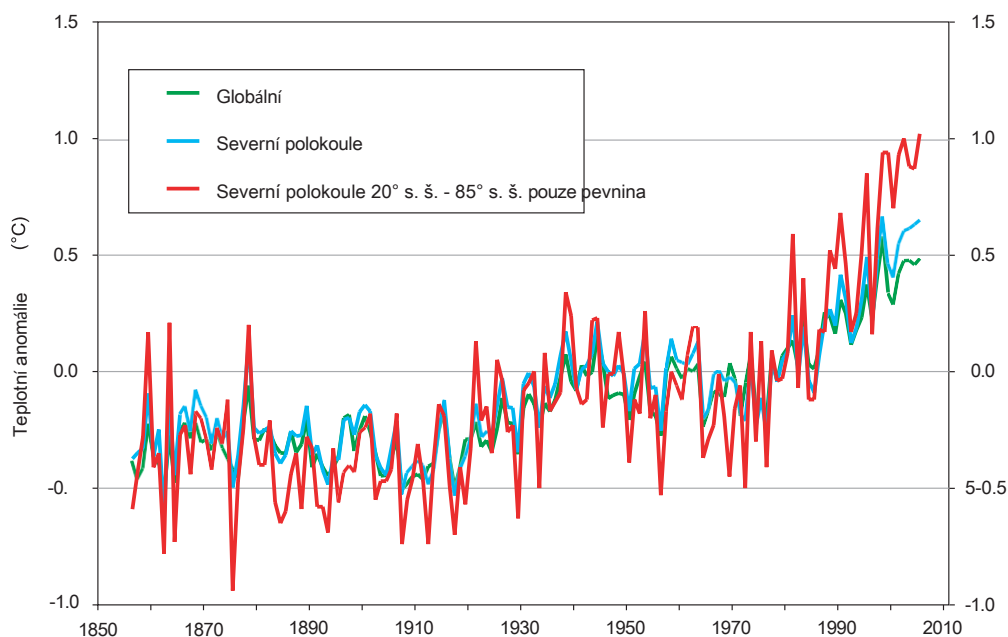
Jen velmi málo záznamů o teplotě vzduchu na pevnině začíná před rokem 1856, takže odhady průměrných hodnot ve velkém měřítku (tj. globálních a polokulových) jsou před touto dobou nejisté. Průměrná SST pro všechny oceány je méně známá než teplota vzduchu na pevnině, zejména v polovině a na konci 19. století, kdy byly velké části tropických a jižních oceánů nedostatečně vzorkovány (a tyto oblasti zůstávají relativně málo vzorkovány). Rozdíly v typech měřících metod, obecně neznámá kalibrace přístrojů a řídký geografický a časový odběr vzorků v mnoha oblastech přispívají k nejistotám v odhadech velkoplošných průměrů. Kromě toho nejsou proxy indikátory diskutované v kapitolách 3-8 obecně přímo citlivé na teplotu vzduchu v 1,5 metru. Například teplotní profily vrtů jsou citlivé na teploty zemského povrchu a izotopové poměry ledu jsou citlivé na teploty atmosféry v úrovni mraků. Mezi teplotami v takovýchto různých výškách vzhledem k zemi mohou existovat významné systematické rozdíly a tyto rozdíly představují jednu z inherentních nejistot při provádění rekonstrukcí povrchových teplot.

VLASTNOSTI INSTRUMENTÁLNÍHO ZÁZNAMU

Velkoplošné průměry

Obrázek 2-1 ukazuje tři velkoplošné průměry ročních průměrných anomálií povrchové teploty ze souboru dat HadCRUT2v (Jones et al. 2001), který se běžně používá jak při rekonstrukcích proxy, tak při obecnějších studiích globálního klimatu.¹ Tyto tři odhady se týkají (1) globální teploty, (2) teplot severní polokoule a (3) pouze extratropických pevninských oblastí severní polokoule (20° s. š. - 85° s. š.). Odhad pro extratropickou pevninskou oblast severní polokoule má ze všech tří největší variabilitu, protože střední a vysoká

¹Dvě další široce používané kompilace globální povrchové teploty, Hansen et al. (2001) a Smith a Reynolds (2005), poskytují velmi podobné výsledky.



OBRÁZEK 2-1 Roční teplotní anomálie ve stupních Celsia na globální úrovni, na severní polokouli a v extratropické oblasti pevniny na severní polokouli ze souboru údajů o povrchové teplotě HadCRUT2v. ZDROJ: Jones et al. (2001).

zeměpisné šířky kontinentální klimatické oblasti obecně vykazují větší teplotní výkyvy prakticky ve všech časových obdobích než ostatní oblasti zeměkoule. Severní polokoule a globální odhady vykazují menší proměnlivost kvůli dodatečnému vlivu SST, která má v jednotlivých letech menší proměnlivost než teploty vzduchu na pevnině, zejména kvůli vyšší tepelné kapacitě smíšené vrstvy oceánu ve srovnání s pevninským povrchem. Vývoj kolísání je v těchto třech velkoškálových průměrech podobný, protože (a) stanice na severní polokouli v extratropickém pásmu pevniny tvoří hlavní část velkoškálových průměrů a (b) větší kolísání v záznamech na severní polokouli v extratropickém pásmu pevniny mají tendenci převládat nad menšími kolísáními v ostatních regionech. Od roku 1978 sledují přístroje na družicích teplotu hluboké vrstvy atmosféry nad povrchem, a přestože se objevují regionální rozdíly, globální průměrné trendy se shodují s oteplováním povrchu o $+0,16\text{ }^{\circ}\text{C}$ za desetiletí v rámci globálního průměru. $\pm 0,04\text{ }^{\circ}\text{C}$ za dekádu (CCSP a SGCR 2006).

Kromě značné meziroční variability vykazují globální instrumentální teplotní záznamy následující nízkofrekvenční rysy: mírný pokles v letech 1856-1910, nárůst o $\sim 0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ mezi lety 1910 a 1945, vyrovnání nebo mírný pokles mezi lety 1945 a 1975 a nárůst o $\sim 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ od roku 1975 do současnosti. Celkový nárůst během 20. století činil přibližně $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, přičemž od té doby bylo zaznamenáno dalších $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pokud 150 let relativně spolehlivých přístrojových dat rozdělíme na tři 50leté úseky - 1856-1905 (I), 1906-1955 (II) a 1956-2005 (III) - průměrná hodnota se pohybuje kolem 50 %.

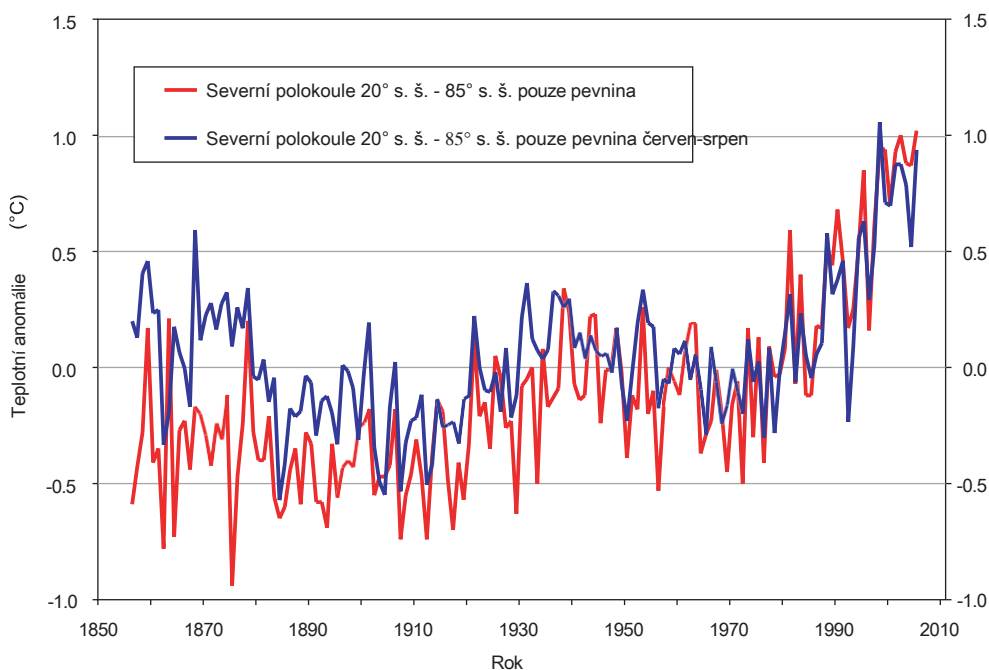
globální teplotní anomálie pro tato tři období ve vztahu k průměru let 1961-1990 jsou -0,32 °C (I), -0,20 °C (II) a +0,11 °C (III). Vzhledem k této variabilitě by rekonstrukce povrchové teploty ve velkém měřítku vyžadovala mimořádně dobrou přesnost, řádově několik setin stupně Celsia, aby bylo možné odlišit (I) od (II). Pro rozlišení (III) od předchozích dvou období by byla přijatelná chyba ~0,15 °C. Pokud jsou tedy teplotní výkyvy pozorované během posledních 150 let reprezentativní pro výkyvy za posledních 2 000 let, je ke kvantitativnímu odlišení globálních průměrných teplot druhé poloviny 20. století od dřívějších jednotlivých padesátiletých období nutná relativně malá (a v celé časové řadě dobře charakterizovaná) přípustná chyba.

Dekádové průměry počínaje rokem 1856 poskytují globální hodnoty v rozmezí od -0,38 °C (1906-1915) do +0,42 °C (1996-2005). Rozlišení globálních průměrných dekadových teplotních anomálií například do tří kategorií (chladná, průměrná, teplá) v kontextu posledních 150 let by tedy vyžadovalo chybu ~0,2 °C nebo méně. Stejně jako u jiných typů analýzy časových řad musí být i zde velikost klimatického signálu dostatečně větší než velikost potenciálních chyb, aby bylo možné učinit přesvědčivé prohlášení o relativní teplotnosti jednotlivých období. To musí platit pro celou délku zkoumaného období, aby bylo možné učinit závěry o tom, která desetiletí mohou být nejteplejší nebo nejchladnější. To je obzvláště obtížné téma pro záznamy založené na proxy, protože pro předinstrumentální éru neexistují žádná absolutní měření teploty na těchto časových škálách. Proto je při rekonstrukcích paleoklimatu kladen velký důraz na odhad chybových charakteristik, které jsou podrobně rozebrány v kapitole 9.

Sezónní a prostorové vzorce

Mnoho zástupných ukazatelů je nejcitlivějších na teplotu v určitých ročních obdobích: Například měření letokruhů stromů jsou obvykle (ale ne vždy) nejcitlivější na průměrné teploty v letním vegetačním období. Pro srovnání jsou na obrázku 2-2 znázorněny roční a letní anomálie teplotních záznamů pro extratropickou pevninu na severní polokouli. Je zřejmé, že mezi oběma obdobími průměrování dochází k rozdílu mezi jednotlivými roky a v počátečním období dokonce mezi desetiletími. Meziroční teploty na severní polokouli se v zimě pohybují ve větším rozmezí než v létě, ale roční průměrná teplota, která je průměrem čtyř sezónních anomálií, má tendenci tyto sezónní výkyvy, které jsou v neletních obdobích větší, vyrovnávat a dává zhruba stejnou meziroční variabilitu jako v létě. Všimněte si však, že 150letý trend ročních průměrných teplot na severní polokouli v extratropické oblasti pevniny je pozitivnější než odpovídající trend letních průměrných teplot (+0,063 °C oproti +0,025 °C za desetiletí). Tento rozdíl by mohl mít význam, pokud by trend ovlivnil statistické kalibrační postupy (viz kapitola 9).

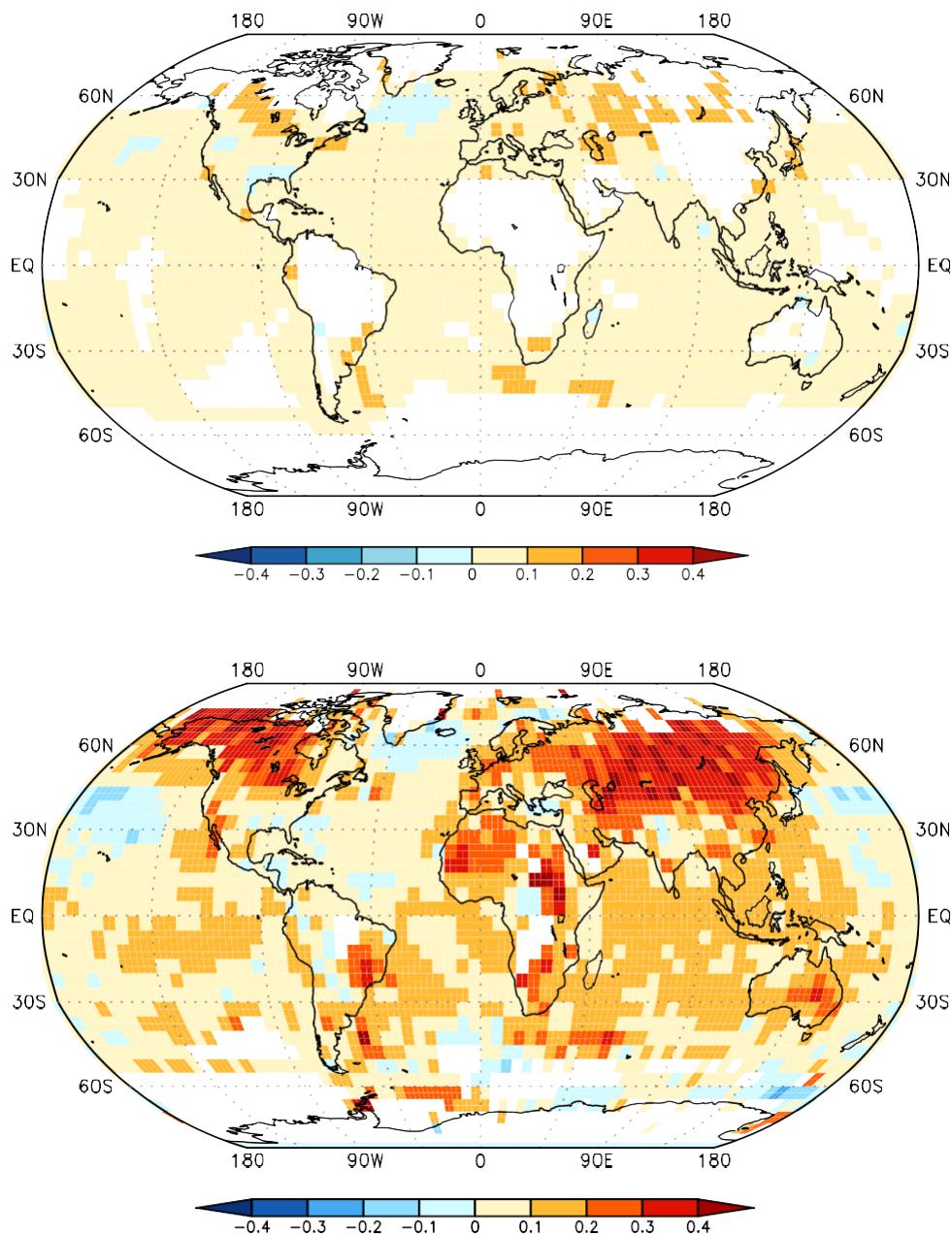
Obrázek 2-3 zobrazuje regionální trendy do roku 2005 počínaje rokem 1870 a rokem 1950. Změna rozložení měření je patrná, protože mapa počínaje rokem 1870 má mnohem horší geografické pokrytí, zejména nad pevninou. Od roku 1950 většina regionů vykazuje pozitivní povrchové trendy, zejména ve středních a vysokých severních šířkách. Tyto pozorované pozitivní trendy v posledních několika desetiletích se někdy neodrážejí v rekonstrukcích založených na stromových letokruzích pro tyto regiony, jak je dále uvedeno v kapitole 4.



OBRÁZEK 2-2 Průměrné roční a letní (červen-srpen) teplotní anomálie ve stupních Celsia pro extratropické oblasti severní polokoule ze souboru dat o povrchových teplotách HadCRUT2v. ZDROJ: Jones et al. (2001).

NEJISTOTY A CHYBY SPOJENÉ S PŘÍSTROJOVÝM ZÁZNAMEM.

Vzhledem k tomu, že rekonstrukce povrchové teploty na základě proxy často závisí buď na lokálních, nebo velkoplošných průměrných teplotách vzduchu na pevnině a/nebo na SST, snižují jakékoli chyby v teplotním záznamu důvěryhodnost rekonstruovaného teplotního záznamu. Měření teploty vzduchu na pevnině v průběhu času ovlivňuje několik faktorů. Jak se měnilo využití půdy (např. z lesa na město), mnoho teploměrů v záznamu teploty vzduchu na pevnině reagovalo na změny tepelných vlastností svého okolí, což vedlo ke změnám teploty, které jsou skutečné, ale nejsou pravděpodobně způsobeny klimatickými příčinami velkého rozsahu. Od roku 1856 se také výrazně rozšířilo geografické rozložení míst zaznamenávajících teplotu vzduchu na pevnině, takže údaje z oblastí, kde se dříve žádná měření neprováděla, nyní poskytují přesnější velkoplošný průměr, což vede k větším chybám v dřívější části záznamu. Podobně kompilace měření SST trpí špatnou kalibrací a výběrem vzorků v dřívějších desetiletích. Odhaduje se, že tyto typy problémů přináší potenciální chybu (95 % spolehlivost) $\sim 0,10$ °C pro první desetiletí průměrných hodnot globální teploty a teploty severní polokoule (Folland et al. 2001b). V posledních desetiletích se díky lepšímu pokrytí a lepší znalostem přístrojových zkreslení, jako je vliv urbanizace, snižuje rozsah chyb na $\sim 0,04$ °C (Brohan et al. v tisku). Tyto potenciální chyby jsou relativně malé



OBRÁZEK 2-3 Pozorované trendy povrchové teploty ve stupních Celsia za desetiletí do roku 2005 počínaje rokem 1870 (nahore) a počínaje rokem 1950 (dole) odvozené z dat HadCRUT2v. ZDROJ: Data z Jones et al. (2001); kresba Todda Mitchella, University of Washington, Seattle. Přetištěno se svolením; copyright 2006.

ve srovnání s výše popsanými pozorovanými dekadovými změnami teploty za posledních 150 let.

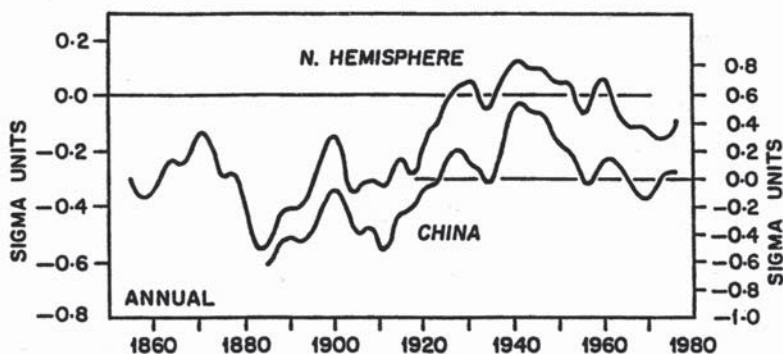
Chyby v instrumentálních záznamech mohou snížit účinnost kalibrace proxy, protože základní vztah, který se při kalibraci hledá, může být do určité míry narušen. Například vztahy mezi proxy a teplotou de-terminované v místním měřítku trpí chybami vyplývajícími z a) nehomogenních dat v místě kalibrace teploty vzduchu na pevnině, b) horizontální vzdálenosti mezi místem kalibrace proxy a místem kalibrace teploty vzduchu na pevnině, c) výškových rozdílů mezi místem kalibrace proxy a místem kalibrace teploty vzduchu na pevnině a d) rozdílů mezi místy kalibrace teploty vzduchu na pevnině, které jsou složeny pro vytvoření souborů kalibračních a validačních dat. V důsledku toho existuje mnoho příležitostí, aby chyby v měřeních a technikách průměrování ovlivnily soubory údajů o teplotě, na jejichž základě se metody kalibrace a ověřování dat používají. Naštěstí při zvětšování velikosti průměrovaných a testovaných vzorků se náhodné a nekorelované chyby obvykle vyruší, což zvyšuje důvěru v získané odchylky.

K tomu se přidává zátěž spojená s novými verzemi jednotlivých datových sad. Odhady výzkumných skupin týkající se velkoplošných průměrných teplot pro jednotlivá období se v průběhu času poněkud změnily. K tomu dochází, když různé skupiny (a) aktualizují primární zdrojová data použitá pro velkoplošné průměry, (b) zavádějí nové postupy úprav nebo (c) přijímají nové techniky prostorového nebo časového průměrování. Proxy záznam kalibrovaný nebo ověřený pomocí rané verze instrumentálního záznamu se tedy může mírně změnit, pokud se změní instrumentální data, na jejichž základě byl proxy záznam kalibrován.

PROBLÉMY S PROSTOROVÝM VÝBĚREM VZORKŮ

Odhadnout počet míst, na kterých je třeba odebírat vzorky povrchové teploty, aby bylo možné reprezentovat změny globální (nebo hemisférické) průměrné teploty s určitou úrovní přesnosti, je úkol neméně náročný než odhad samotných změn teploty. Nejzřejmějším způsobem, jak tento problém řešit, je pokusit se replikovat kolísání teploty Země v instrumentálním záznamu pomocí omezených podskupin staničních dat. Účinnost tohoto přístupu je omezena délkou pozorovacího záznamu. Jedním ze způsobů, jak toto omezení překonat, je odebírat vzorky mnohem delších časových řad syntetických výkyvů klimatu generovaných klimatickými modely, ale tato strategie je ohrožena omezenou schopností modelů simulovat výkyvy teploty v časovém měřítku od století do století a v prostorových měřítkách, která reprezentují vysoce proměnlivý charakter zemského povrchu. Dosud provedené studie naznačují, že k replikaci variability v instrumentálním záznamu postačí 50-100 geograficky rozptýlených lokalit (např. Hansen a Lebedev 1987, Karl et al. 1994, Shen et al. 1994). Tyto výsledky naznačují, že teplotní výkyvy v přístrojovém záznamu jsou dobře rozlišené; to znamená, že proxy záznamy obecně odrážejí stejnou variabilitu jako přístrojové záznamy tam, kde se překrývají (Jones et al. 1997). Ponechávají však otevřenou otázku, zda jsou proxy záznamy dostatečně početné a geograficky rozptýlené, aby bylo možné rozlišit hlavní rysy v časových řadách teploty Země sahajících stovky nebo dokonce tisíce let zpět.

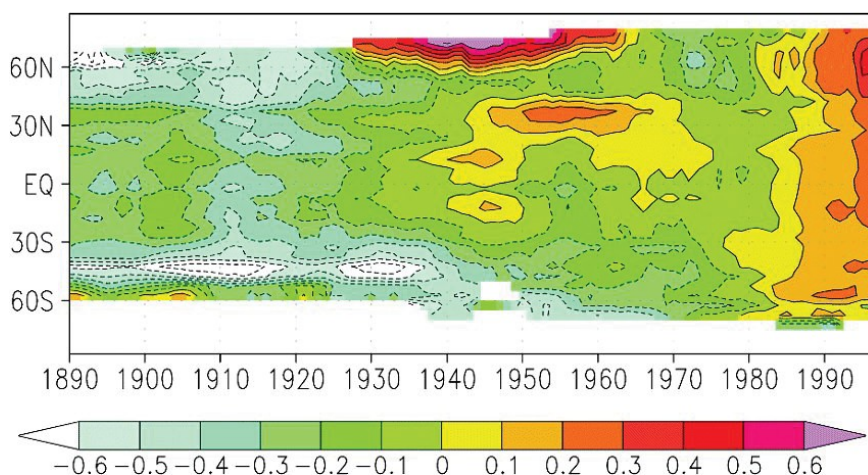
Naděje na spolehlivý průzkum teploty severní polokoule a globální teploty povrchu, který by sahal daleko za instrumentální záznam, jsou založeny na předpokladu, že lokální změny teploty povrchu v časovém měřítku několika století a delším jsou.



OBRÁZEK 2-4 Vyhlazená časová řada normalizované průměrné roční teploty vzduchu při povrchu zprůměrovaná pro Čínu a celou severní polokouli. ZDROJ: Bradley et al. (1988). Přetištěno s laskavým svolením Springer Science and Business Media; copyright 1988.

dominují změny globální průměrné teploty, které jsou reakcí na změny v globální energetické bilanci. Pokud je tento předpoklad správný, vyplývá z toho, že časové řady teplot v bodech na Zemi by měly být silněji korelovány s časovými řadami globální průměrné teploty na těchto delších časových škálách, než je tomu v měřítku od roku k roku. Tento názor podporuje několik prací (např. Leung a North 1991, Shen et al. 1994), stejně jako časové řady znázorněné na obr. 2-4 (Bradley et al. 1988). Silná shoda mezi křivkami severní polokoule a Číny naznačuje, že velkou část desetileté a stoleté variability průměrné teploty severní polokoule od roku 1880 lze zachytit pouze pomocí údajů z čínské staniční sítě. Časové řady teplot na jednotlivých místech v Číně samozřejmě nejsou tak silně korelovány s průměrnými časovými řadami na polokouli jako časové řady pro Čínu na obr. 2-4 a proxy časové řady nerepresentují dokonale skutečné časové řady změn povrchové teploty. Ještě je třeba udělat mnoho práce, aby se požadavky na prostorové vzorkování staly pevným základem.

Další otázkou, která vyvstává při interpretaci proxy záznamů povrchové teploty za posledních 2 000 let, je míra, do jaké jsou časové řady teplot v různých zeměpisných šířkách reprezentativní pro globální průměrnou teplotu. Přístrojové záznamy povrchové teploty uvedené na obr. 2-5 jsou v tomto ohledu poučné. Nárůst přízemní teploty vzduchu, k němuž došlo ve 20. letech 20. století, a mírný pokles v 50. letech 20. století byly mnohem výraznější ve vysokých zeměpisných šířkách severní polokoule než v nižších zeměpisných šířkách. Naproti tomu oteplování v posledních několika desetiletích bylo v zeměpisných šířkách mnohem rovnoměrnější. Šířkově závislé rysy na obrázku 2-5 slouží jako připomínka, že ne veškerá variabilita ve vysokých zeměpisných šířkách, jak ji zaznamenávají měření ledových jader a proxy-soustavy ve vysokých zeměpisných šířkách, musí nutně reprezentovat změny globální průměrné teploty.



OBRÁZEK 2-5 Vyhlazené zonální průměrné anomálie povrchové teploty (v K) pro pozorování v každém pásmu zeměpisné šířky v letech 1890-1999. Anomálie jsou vztaženy ke klimatologii z let 1961-1990. ZDROJ: Delworth a Knutson (2000). Přetištěno se souhlasem AAAS; copyright 2000.

3

Dokumentární a historické důkazy

- Historická pozorování a dokumenty poskytují cenné, sezónně specifické informace o teplotách a dalších charakteristikách klimatu v minulosti, ale před rokem 1700 n. l. se důkazy ztenčují a často jsou nesouvislé.
- Evropa a východní Asie jsou dvě oblasti světa, kde se podařilo na základě dokladů opakovaně a konzistentně vytvořit teplotní řady delší než 200 let. Tyto důkazy ukazují, že v obou regionech došlo k celkovému středověkému oteplení a ochlazení v malé době ledové, ale vzhledem k jejich nedostatečnému množství a někdy i špatné kvalitě dat je jen z těchto zdrojů velmi obtížné zjistit, zda bylo středověké období stejně teplé nebo teplejší než konec 20. a začátek 21. století.
- Historické a archeologické důkazy mohou odhalit, jak společnosti v minulosti reagovaly na proměnlivost klimatu. Ty ukazují, že reakce společnosti nebylo možné předem předvídat a že úspěšné adaptace na nové klimatické podmínky závisely na dobrých či špatných rozhodnutích lidí.

TYPY DŮKAZŮ

Historická pozorování, která se dochovala především v dokumentární podobě, mohou poskytnout cenné záznamy o minulých klimatických stavech (Lamb 1982). Například schematická teplotní křivka pro poslední tisíciletí obsažená v první zprávě Mezivládního panelu pro změnu klimatu (IPCC 1990; viz také obrázek O-3) čerpala z velké části z dokumentárních údajů. Kromě systematických meteorologických záznamů, jaké použil Manley (1974) při sestavování svých záznamů teplot ve střední Anglii, existuje celá řada přímých i nepřímých

TABULKA 3-1 Typy dokumentárních důkazů používaných pro *rekonstrukci* klimatusa

Přímé údaje	<i>Popisy</i> Deníky počasí Přírodní katastrofy	<i>Přímá měření</i> Teplota Srážky Tlak	
Nepřímý (nebo zprostředkovaný) data	<i>Organic</i> Fenologické údaje Hrozny a plodiny sklízně	<i>Anorganické</i> Povodňové značky Icing a rozpady Doba trvání sněhu kryt	<i>Materiálové zdroje</i> Nápisy Obrazy Fotografie Mapy a grafy Rogation <i>processionsb</i>

aNa základě Pfister (1992). Přetištěno se svolením nakladatelství Routledge; copyright 1992.
bKřesťanské zemědělské slavnosti.

proxy klimatické informace (tabulka 3-1). V klasické rané studii Ladurie (1972) použil zemědělské a ^{fenologické} záznamy, aby zdokumentoval období svátků a hladomorů v západní Evropě během malé doby ledové (zhruba 1500-1850). Dalším doplňujícím zdrojem dat jsou deníky a zápisky, například deník, který si vedl Benjamin Franklin, když byl v 80. letech 17. století americkým velvyslancem v Paříži. Franklin zaznamenal "neustálou suchou mlhu, na kterou sluneční paprsky zřejmě neměly velký vliv" spolu se silnými pozdními mrazy, které dnes připisujeme erupci sopečné trhliny Laki na Islandu (Grattan a Brayshay 1995).

Mnohé historické dokumenty, spíše než záznamy o počasí jako *takovém*, poskytují nepřímé důkazy o klimatických podmínkách v minulosti. Historické malby alpské krajiny nám například umožňují přesně určit bývalý rozsah ledovců v přesných časových okamžicích, a přispívají tak k rekonstrukci teplot odvozených ze záznamů o délce ledovců, o nichž se hovoří v kapitole 7. Podobné, ale potenciálně souvislejší časové řady mořského ledového pokryvu byly odvozeny ze záznamů velrybářů v Antarktidě a z pozorování driftového ledu kolem pobřeží Islandu (např. Ogilvie 1992, de la Mare 1997). V tropech a v suchých oblastech jsou nejčastěji uváděna období sucha a záplav; Endfield et al. (2004) například použili archivní zdroje k rekonstrukci kolísání srážek ve španělském koloniálním Mexiku. Aby bylo možné kvantifikovat dlouhé řady takovýchto dokumentárních údajů z klimatického hlediska, je třeba je, stejně jako ostatní proxy údaje, kalibrovat na základě instrumentálních měření. Brázdil et al. (2005) podávají ucelený přehled metodologického rámce, v němž jsou historické archivy a dokumenty v současnosti využívány.

OMEZENÍ A PŘÍNOSY HISTORICKÝCH A DOKUMENTÁRNÍCH PRAMENŮ.

Všechny historické prameny je třeba hodnotit kriticky, a to i pro relativně nedávnou dobu. Například na zamrzlé hladině řeky se běžně konaly mrazivé trhy.

¹Fenologie se zabývá studiem ročních cyklů rostlin a živočichů a jejich reakcí na sezónní změny prostředí.

Temže v Londýně během chladných zim malé doby ledové, z nichž poslední nastala v roce 1814. Bylo by však zcela nesprávné přičítat jejich nepřítomnost od té doby pouze zvýšení zimních teplot na severní polokouli: Vlivem růstu a rozvoje Londýna se pravděpodobnost mrazů v centru města snížila vlivem "městského tepelného ostrova" a nahrazení starého londýnského mostu ve 30. letech 19. století umožnilo větší příliv slané vody, která hůře zamrzá. Manleyho teplotní řada pro centrální Anglii ukazuje, že zima 1962-1963 byla třetí nejchladnější od roku 1659, přesto Temže nezamrzla pod hranicí přílivu (Jones a Mann 2004b).

Problém kontroly kvality se stává ještě palčivějším, takže - na rozdíl od přírodních archivů, jako jsou ledová jádra nebo letokruhy stromů - historické záznamy obecně ztrácejí na své užitečnosti s tím, jak stárnou. Například v irských a severských kronikách se dochovaly záznamy o počasí až do poloviny prvního tisíciletí našeho letopočtu, ale jejich datování je nepřesné a popisy počasí a klimatu jsou často přehnané. Historická pozorování se také pochopitelně zaměřují spíše na extrémní události než na klimatické průměry. Například právě velké bouře nejvíce zajímaly benátské obchodníky a námořníky; jejich záznamy použil Grove (2004) k rekonstrukci klimatu Kréty v 16. a 17. století. Listinné důkazy jsou jedním z mála dostupných druhů, které mohou zaznamenat silné povodně, hurikány a další přírodní katastrofy. Jejich analýza proto umožňuje zkoumat vztah mezi výkyvy klimatu a četností a závažností extrémních událostí, což je téma, které je v souvislosti s předpokládaným globálním oteplováním předmětem velkého společenského zájmu.

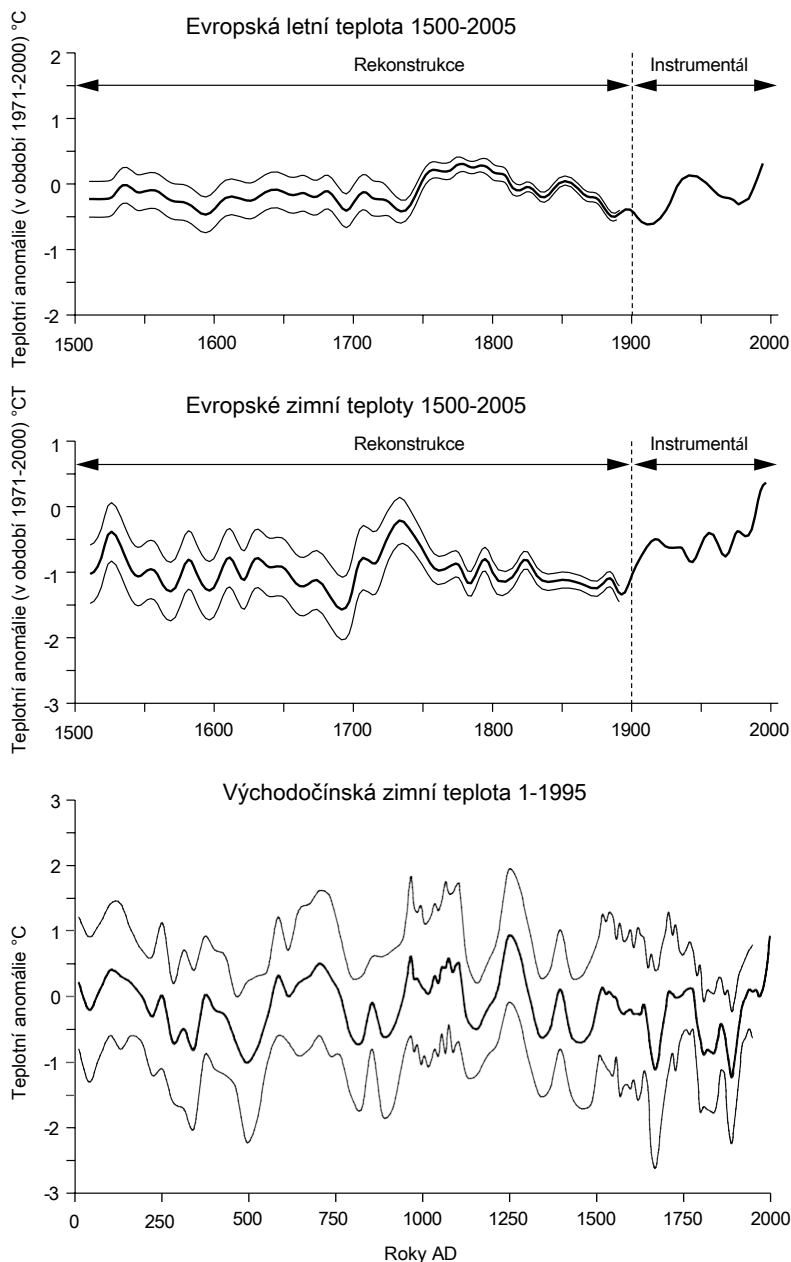
Historická pozorování jsou obvykle v čase nespojitá, a proto je jednou z jejich nejcennějších rolí poskytovat křížovou kontrolu rekonstrukcí založených na jiných proxy záznamech, jako jsou například letokruhy stromů, a platnosti simulací paleoklimatických modelů. Například modelové experimenty ukazují výrazné oteplení na Sibiři během zim bezprostředně následujících po velkých explozivních sopečných erupcích, jako byla erupce sopky Pinatubo (Shindell et al. 2003). Deníky cestovatelů projíždějících severním vnitrozemím Asie v klíčových letech (např. 1815-1816, 1883-1884) by umožnily tuto předpověď nezávisle ověřit.

SYSTEMATICKÉ REKONSTRUKCE KLIMATU ODVOZENÉ Z HISTORICKÝCH ARCHIVŮ.

Evropa a východní Asie jsou dva regiony světa, kde byly dlouhé teplotní řady nejlépe vytvořeny na základě dokladů, a to opakovaně a konzistentně pro období delší než poslední dvě století.

Evropa

Přehled dokladů pro Evropu jako celek provedli Brázdil et al. (2005) a pro oblast Středomoří Luterbacher et al. (2006). Pro většinu oblastí střední a západní Evropy byly shromážděny údaje o sezónních teplotách až do roku 1500, které ukazují, že konec 20. a začátek 21. století byly s vysokou pravděpodobností ve třech ze čtyř ročních období teplejší než kterékoli období v posledních pěti stoletích (Xoplaki et al. 2005) (obr. 3-1). Kombinací dokumentárních důkazů s dalšími proxy údaji se Luterbacherovi et al (2004) podařilo zmapovat zimní a letní teplotní anomálie v celé Evropě pro jednotlivé roky zpětně až do roku 1500, spolu s



OBRÁZEK 3-1 Rekonstrukce sezónních teplot na základě historických údajů z Evropy a Číny se standardními chybami (2 standardní odchylky pro Evropu, 1 standardní odchylka pro Čínu). Záznamy z dvacátého století (pro Čínu po roce 1950) jsou založeny na přístrojových datech a neuvádějí chybové úsečky. Všechna data podléhají 30letému vyhlazení. ZDROJE: (2005), Luterbacher et al. (2004) a Ge et al. (2001). Přetištěno s povolením Taylor & Francis Ltd. (<http://tandf.co.uk/journals>); copyright 2001.

s odhady chyb specifickými pro danou oblast. Toto mapování umožňuje důsledně posoudit prostorovou provázanost minulých ročních až dekadových klimatických změn v subkontinentálním měřítku a také umožnilo Paulingovi a kol. (2003) vypočítat nejlepší předpovědi zimních a letních teplot z dostupné řady různých proxy klimatických dat pro různé části Evropy a severního Atlantiku. Ukázalo se například, že letokruhy stromů byly dobrým prediktorem minulých letních teplot v severní a střední Evropě, zatímco dokumentární zdroje jsou spolehlivější pro rekonstrukci zimních teplot.

V Evropě jsou v současné době k dispozici pouze dva souvislé záznamy před rokem 1500, a to z České republiky (Brázdil 1996) a z Nízkých zemí (Netherlands a Belgie; van Engelen et al. 2001), které byly zahrnuty do syntetických rekonstrukcí teplot ve velkém měřítku (např. Jones a Mann 2004b). Označují 20. století jako mimořádně teplé, ale zároveň naznačují mírnější podmínky před rokem 1400, zatímco český záznam ukazuje i vyšší teploty kolem přelomu 19. a 20. století. Systematické, kvantitativní údaje o teplotách v celé Evropě během středověku však není možné získat pouze z historických dokumentů. Přestože historické prameny poskytují důležité neoficiální důkazy pro toto období, je velmi obtížné zjistit - pouze z těchto omezených a poměrně nepřesných zdrojů - zda existovala středověká období trvající deset let nebo déle, kdy bylo klima stejně teplé nebo teplejší než na konci 20. a na počátku 21. století.

Východní Asie

Druhou oblastí, pro kterou existují systematické teplotní syntézy trvající sedm století, je východní Asie. Například v Koreji a Japonsku se datum jarního květu třešňí zaznamenává systematicky každý rok již více než tisíc let (Aono a Omoto 1993). Wang et al (2001) použili dokumentární záznamy k sestavení desetiletých průměrných ročních teplot pro východní a severní Čínu až do roku 1380 a padesátiletých průměrných teplot pro východní Čínu až do roku 800 po Kristu. V některých případech (např. Yang et al. 2002) byly dokumentární údaje sloučeny s dalšími proxy-klimatickými údaji a vytvořeny regionální složené teplotní křivky. Výsledky Ge et al (2001) využívající fenologické záznamy doplněné o záznamy zimních sněhových dnů z historických dokumentů, reprodukované na obr. 3-1, ukazují teploty nad dlouhodobým průměrem od roku 950 do roku 1300 n. l. a opět po roce 1925, s teplotními minimy malé doby ledové v 17. a 19. století. Tyto údaje z opačných konců euroasijské pevniny podporují myšlenku, že středověké oteplení a malá doba ledová zasáhly velkou část, ne-li celou extratropickou pevninu severní polokoule, nehledě na značné rozdíly v ročních až dekadových časových měřících v obdobích oteplení a ochlazení.

Listinné důkazy se obecně omezují na regiony s dlouhou písemnou tradicí. Historická časová hloubka je pravděpodobně dostatečná v několika dalších regionech světa, aby bylo možné se pokusit o systematické sestavení sezónních nebo ročních časových řad teplot z dokumentárních důkazů. Tento potenciál existuje, ale dosud nebyl využit, v jižní a jihovýchodní Asii a na Blízkém východě. Příkladem této kapacity, i když pro africké srážky, je nilometr Roda, který zaznamenal roční údaje o výšce nilské záplavy v Egyptě od roku 645 do roku 1890 n. l. (Hassan 1981).

DŮSLEDKY ZMĚNY KLIMATU PRO SPOLEČNOSTI V MINULOSTI

Historické dokumenty spolu s archeologickými a paleobiologickými důkazy mohou také odhalit, jak společnosti a ekosystémy v minulosti reagovaly na proměnlivost klimatu. V této části je uveden krátký ilustrativní přehled reakcí člověka na klimatické změny v minulosti. Je však důležité upozornit na nebezpečí kruhového uvažování v této oblasti v tom smyslu, že stejné důkazy o kulturní reakci nelze použít také k vyvození klimatické kauzality. Je také zřejmé, že minulé reakce společnosti nebyly obecně předvídatelné nebo předem dané. Ačkoli se společnosti možná musely přizpůsobit novým podmínkám, výsledek závisel na úspěšnosti učiněných rozhodnutí (Diamond 2005, Rosen v tisku).

Důsledky měnících se klimatických podmínek se často bezprostředně projevují v agrární ekonomice, zejména v ekologicky okrajových oblastech, a v dálkové komunikaci. V prvním případě došlo k rozsáhlému zmenšení venkovského osídlení ve vrchovinných oblastech Evropy do níže položených terénů, což souviselo s celkovým zhoršením klimatu mezi koncem 16. a polovinou 18. století (Parry 1978). Na Islandu ztížilo zvýšení bouřek a zimního zalednění moře během malé doby ledové námořní komunikace přes severní Atlantik, na nichž bylo obyvatelstvo ostrova kriticky závislé. Osmdesátá léta 19. století přinesla nejen nejsilnější ledové bouře ze všech desetiletí od 16. století (Ogilvie 1992), ale také otravu hospodářských zvířat a lidí fluorovodíkovými plyny uvolněnými při erupci trhliny Laki. V kombinaci s tím zahynulo více než 75 % islandského dobytka a 25 % lidské populace a společnost se přiblížila kolapsu. Dalšími příklady, kdy změna klimatu mohla hrát roli v kolapsu společnosti, jsou klasičtí Mayové v 9. století n. l. a Anasaziové na americkém jihozápadě ve 12. a 13. století. Oba tyto případy byly spojeny s obdobími dlouhodobého sucha (Hodell et al. 1995, Dean 1998). Stres vyvolaný klimatem může také působit jako podnět k inovacím; například pokles srážek nebo změny teplot byly někdy následovány technologickým rozvojem, například zavlažováním (Rosen v tisku).

Lze také najít příklady klimatických změn, které nebyly doprovázeny žádnými zjevnými přímými sociálními důsledky, a případy, kdy stejná klimatická změna měla pro různé sociální skupiny v téže oblasti ostře kontrastní důsledky. Jasným příkladem kontrastních adaptací a úspěchů/neúspěchů ve stejném prostředí jsou Inuité a Vikingové v západním Grónsku a Arktidě během nástupu malé doby ledové. Norské osady v Grónsku byly vždy okrajové, a to nejen kvůli klimatickým podmínkám nevhodným pro zemědělství, ale také kvůli izolaci od mateřských kultur v severní Evropě. Tváří v tvář stále drsnějším klimatickým podmínkám populace klesala, západní vikinské osídlení bylo opuštěno kolem roku 1350 a východní osídlení následovalo tento příklad asi o sto let později. Nepříznivé změny klimatu vnímali Seveřané jako funkci kosmologického nepořádku a stavěli stále impozantnější kostely, místo aby zaváděli nové technologie nebo hledali nové zdroje potravy (Barlow et al. 1997, Buckland et al. 1996, McIntosh et al. 2000, Diamond 2005, Rosen in press).

Zdá se, že ve stejném období středověkého oteplení, které podpořilo severskou expanzi, umožnil ústup mořského ledu migraci původních Inuitů podél arktického pobřeží z Aljašky na východ a odtud na jih do stejných oblastí západního Grónska, které kolonizovali Vikingové. A stejně jako Seveřané, i tito Inuité z Thule

Kultury se musely neustále přizpůsobovat, aby mohly využívat dostupné zdroje; například jejich metody lovu velryb se musely přizpůsobovat podle toho, zda byl mořský led blízko nebo daleko od pobřeží (Wohlforth 2004). Zdá se, že mezi Seveřany a národy Thule docházelo jen k malým kontaktům a k žádné kulturní výměně, takže Seveřané možná ani nevěděli o úspěšných inuitských adaptacích na využívání mořských zdrojů. V období malé doby ledové se Inuité museli opět přizpůsobit měnícím se podmínkám prostředí. Například aby mohli pokračovat v lovu velryb, shromažďovali se jejich obyvatelé na severním svahu Aljašky na několika málo místech na pobřeží, kam se ještě dalo dostat na otevřenou vodu, jako je Nuvuk (Point Barrow). Díky tomuto a dalším rozhodnutím Inuité - na rozdíl od Seveřanů - přežili v Arktidě až do moderní doby.

4

Kruhy stromů

- Měření parametrů letokruhů stromů z oblastí, kde teplota omezuje růst stromů, lze použít k rekonstrukci povrchové teploty. Ty ukazují, že oteplení ve 20. století bylo neobvyklé přinejmenším od roku 1500.
- Stromové letokruhy mají několik vlastností, které je činí vhodnými pro rekonstrukci klimatu, jako je snadná replikace, široká geografická dostupnost, anuální až sezónní rozlišení a přesné, vnitřně konzistentní datování.
- Záznamy o letokruzích stromů existují za poslední dvě tisíciletí, ačkoli prostorové pokrytí se směrem do minulosti snižuje.
- Rekonstrukce povrchové teploty na základě letokruhů stromů vyžadují zohlednění matoucích faktorů; existují pokyny, jak tyto faktory identifikovat a zohlednit.

DEFINICE A PŘEDPOKLADY

Dendroklimatologie je aplikace vědy o letokruzích stromů neboli dendrochronologie na studium klimatu (Fritts 1976). Online bibliografie dendrochronologie (Dobbertin a Grissino-Mayer 2004) obsahuje více než 10 000 odkazů zabývajících se otázkami z archeologie, klimatologie, ekologie, lesnictví, hydrologie, geologie, geomorfologie a dalších oblastí. Značná část údajů o letokruzích stromů shromážděných na všech obydlených kontinentech je volně dostupná online (Grissino-Mayer a Fritts 1997).

Dendroklimatické záznamy se běžně získávají z oblastí, kde růst dřeva souvisí s klimatem. Pokud jde o teplotu vzduchu,¹ upřednostňované lokality se nacházejí v blízkosti stromové linie, která představuje tzv.

¹Tato kapitola se nezabývá dalšími četnými klimatickými proměnnými (např. srážkami a suchem), které lze studovat pomocí záznamů letokruhů stromů. Nezabývá se ani dalšími environmentálními faktory (např. lesními požáry), které lze rekonstruovat na základě charakteristik letokruhů stromů.

určuje výškovou nebo šířkovou hranici růstu stromů (Kullman 1998, Körner 1999). Na základě přehledu publikovaných údajů dospěl Grace (1988) k závěru, že "lze očekávat, že zvýšení teploty o 1 °C v severním mírném pásmu zvýší produktivitu rostlin přibližně o 10 %, pokud se ostatní faktory, jako je voda nebo živiny, nestanou limitujícími". Kontrolované experimenty zabývající se vlivem teploty na růst rostlin jsou většinou prováděny na bylinných druzích nebo semenáčcích (Junttila 1986, Loveys et al. 2002) a je obtížné extrapolovat tato zjištění na prostorová a časová měřítka, která zvažují dendroklimatologové. Vezměme si například důkazy o posunu stromové linie v mnoha oblastech světa (MacDonald et al. 1998, Esper a Schweingruber 2004, Millar et al. v tisku). Taková pozorování se nesnadno podrobují experimentálnímu testování příčinných mechanismů. Tvrdí se, že poloha stromů není vysoce citlivá na interdekadální změny teploty (Paulsen et al. 2000), ale spíše odráží proměnlivost prostředí v průběhu několika set let (Lloyd a Graumlich 1997, Körner 1999). Míru citlivosti a rychlost reakce stromořadí na změny teploty ovlivňují také lokální disturbance, stanovištní podmínky a regionální klimatické režimy (Kjällgren a Kullman 2002, Daniels a Veblen 2003).

Biologická souvislost mezi teplotou a změnami letokruhů stromů v hodinovém až ročním měřítku byla zkoumána v terénu pomocí specializovaných přístrojů zvaných dendrometry (Biondi et al. 2005) spolu s pozorováním anatomie dřeva (Deslauriers et al. 2003a). U evropských a severoamerických jehličnanů žijících v chladném prostředí dochází k tvorbě letokruhů většinou od května do začátku srpna, přičemž vrchol nastává v době maximální délky dne (Rossi et al. 2006 a odkazy tamtéž). Sledováním velikosti kmene *Pinus cembra* a teploty během vegetačního období po celé dva roky v Alpách bylo zjištěno, že radiální expanze ustane vždy, když teplota vzduchu klesne pod 5 °C (Körner 1999). Noční teplota byla pro regulaci radiálního růstu jedle balzámové v zeměpisné šířce kolem 50° s. š. důležitější než denní teplota (Deslauriers et al. 2003b). V delším časovém horizontu (měsíčním až dekadovém) byl v řadě dendroklimatických studií zjištěn pozitivní lineární vztah mezi průměrnou červencovou teplotou a chronologií šířky letokruhů *Pinus sylvestris* v severní Fennoskandii (Mikola 1962, Kalela-Brundin 1999, Helama et al. 2002).

Z hlediska příčinných mechanismů jsou záznamy letokruhů stromů pravděpodobně výsledkem vícerozměrných a často nelineárních biofyzikálních procesů. K vysvětlení těchto procesů byly navrženy modely založené na ekologických nebo fyziologických koncepcích (Fritts et al. 1991, Hunt Jr. et al. 1991, Scuderi et al. 1993, Berninger et al. 2004, Misson 2004). Zajímavá hypotéza o schopnosti stromových druhů borovic zaznamenávat pomalu se měnící povrchové teploty spočívá v tom, že jehlice vytvořené v jednom vegetačním období zůstávají živé a funkční po dobu 10-30 let (LaMarche 1974). Mechanistické základy statistických modelů používaných k extrakci klimatických signálů z údajů o letokruzích stromů byly shrnuty do simulačních modelů zaměřených na aktivitu tkáně tvořící dřevo, cévního kambia (Vaganov et al. 2006). Všimněte si také, že lineární vztahy mezi záznamy letokruhů stromů a klimatem jsou přinejmenším stejné a často převyšují vztahy zjištěné u jiných zástupných ukazatelů (Jones et al. 1998). Statistické techniky, které lépe reagují na nelineární interakce, zatím poskytly relativně malé zlepšení pro vysvětlení klimatické variability (Hughes 2002 a odkazy tamtéž).

Všechny proxy záznamy klimatu jsou získávány ze vzorků, které nejsou náhodně vybrané (Cronin 1999). Část schopností výzkumníka spočívá ve vytipování lokalit, kde jsou proxy záznamy co nejdelší, souvislé a reprezentativní pro cílovou klimatickou proměnnou. V literatuře o letokruzích stromů byly specifikovány pokyny

(Schweingruber 1988, Fritts a Swetnam 1989), aby se zajistilo, že výběr vzorků (lokalita, strom a jádro) je založen na kritériích *a priori*, nikoli *a posteriori*. Například lokality se vybírají v odlehlých oblastech, kde je hustota stromů nízká, aby se minimalizoval vliv dynamiky porostu a konkurence mezi stromy (Biondi et al. 1994). Vliv rozdílných místních podmínek na dendroklimatické záznamy byl studován u nadmořské výšky, sklonu a expozice (Kienast a Schweingruber 1986, Villalba et al. 1994, Buckley et al. 1997, Tardif et al. 2003, Piovesan et al. 2005), topografické konvergence a potenciální relativní radiace (Bunn et al. 2005) a vzorců záplav (Tardif a Bergeron 1997). Vzorkované stromy by neměly vykazovat známky disturbančních faktorů, jako je napadení hmyzem, pastva, poškození požárem, využívání člověkem, napadení houbami nebo napadení mlhovinami (Schweingruber 1988, Fritts a Swetnam 1989). Celkově lze říci, že stejně jako při jakémkoli jiném terénním výzkumu změn prostředí je vymezení výzkumné otázky předpokladem pro správný výběr materiálů a metod (Bräker 2002).

TERÉNNÍ A LABORATORNÍ METODY

Pro zajištění spolehlivých výsledků klade věda o letokruzích stromů velký důraz na jejich opakování (Wigley et al. 1984, Fritts a Swetnam 1989). Na lokalitě se odebírají vzorky nejméně 10-20 stromů od každého druhu, většinou se odebírají přírůstková jádra, přičemž každý strom je jádrován podle zvláštních pokynů (Grissino-Mayer 2003). Všechny odebrané vzorky jsou převezeny zpět do laboratoře, kde jsou vzájemně porovnány. K přiřazení kalendářních roků k jednotlivým letokruhům se používá metoda křížového datování (neboli porovnávání vzorů) (Baillie a Pilcher 1973, Wigley et al. 1987, Yamaguchi 1991). Zpočátku se vycházelo z vizuálního porovnání (Stokes a Smiley 1996), po změření šířky letokruhů se kvalita křížového datování kontroluje pomocí numerických technik (Holmes 1983, Grissino-Mayer 1997). Přesnost a preciznost křížového datování umožnila zdokonalení radiokarbonových datovacích technik (LaMarche a Harlan 1973, Friedrich et al. 2004). Vývoj chronologie stromových letokruhů se řídí pravidly, která jsou společná pro všechny aplikace vědy o stromových letokruzích, a je zcela nezávislý na jakýchkoli klimatických údajích. Vzorky nebo části vzorků, které nelze křížově datovat se zbytkem vzorků, nejsou do konečné chronologie zahrnuty. Byla publikována doporučení archivovat veškerý nasbíraný materiál, aby zůstal k dispozici pro budoucí studium (Eckstein et al. 1984). V Laboratoři pro výzkum stromových kruhů na Arizonské univerzitě jsou stále k dispozici vzorky dřeva, terénní poznámky a měření, které před sto lety pořídil A. E. Douglass, tucsonský astronom, který navrhl mnoho dodnes používaných dendrochronologických metod (Webb 1983).

Po křížovém datování lze měřit jiné parametry letokruhů stromů než šířku (např. hustotu, stabilní izotopové složení, velikost a tloušťku buněk, hustotu pryskyřičných kanálků a koncentraci stopových kovů). Dendroklimatické studie minulých povrchové teploty jsou většinou založeny na šířce letokruhů nebo maximální hustotě pozdního dřeva; ta má obvykle vyšší korelaci s teplotou, zejména v létě (Conkey 1986, Briffa et al. 2002). Maximální hustota pozdního dřeva také koreluje s anatomii letokruhů měřenou počtem buněk, průměrem buněk a tloušťkou buněčné stěny (Wang et al. 2002). Měření provedená na vzájemně datovaných vzorcích dřeva stejného druhu a ze stejné lokality se obvykle spojují do hlavní chronologie (Fritts 1976, Cook a Kairiukstis 1990). Cílem tohoto postupu je zvýšit klimatický signál snížením významu šumu jednotlivých vzorků. Obecně platí, že počet vzorků potřebných k získání robustní chronologie se zvyšuje s tím, jak se snižuje společný rozptyl mezi vzorky (Fritts

a Swetnam 1989). Přestože jsou do konečné chronologie zaneseny všechny vzorky s křížovým datováním, standardizace odstraňuje rozdíly v průměrné rychlosti růstu mezi jednotlivými exempláři, takže v záznamu nepřevažují rychleji rostoucí stromy. Jakákoli kritéria použitá k vytvoření chronologie z podskupiny křížově datovaných vzorků je třeba jasně uvést a zdůvodnit.

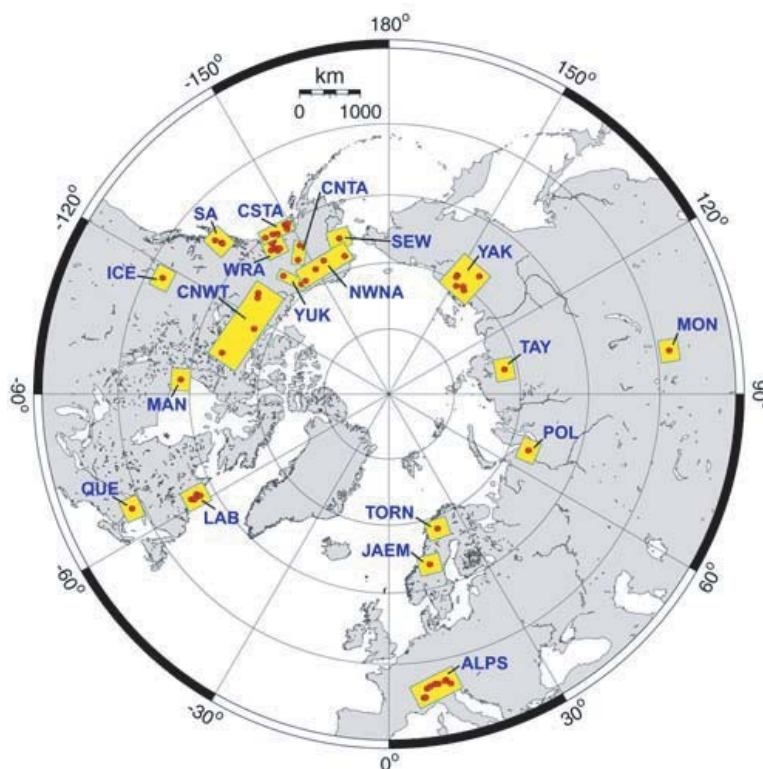
Identifikace meziročních (vysokofrekvenčních) klimatických signálů v záznamech letokruhů stromů je poměrně jednoduchá, protože je založena na odstranění autokorelace časových řad pomocí autoregresních modelů (Biondi a Swetnam 1987, Cook a Kairiukstis 1990). Pokud jsou k dispozici dostatečně dlouhé instrumentální záznamy, je dokonce možné zkoumat stacionaritu statistických vztahů mezi klimatickými proměnnými a parametry letokruhů stromů s ohledem na více časových intervalů (Biondi a Waikul 2004).

Pokud jde o nízkofrekvenční teplotní vzorce, může rekonstrukci ovlivnit délka jednotlivých záznamů letokruhů stromů použitých k vytvoření hlavní chronologie (spíše než délka samotné chronologie) (Cook et al. 1995). Je také obtížné rozlišit množství časové autokorelace v záznamech letokruhů stromů, které souvisí s biologickými procesy namísto klimatických (Fritts 1976). Jedním ze způsobů, jak tyto problémy vyřešit, je vypočítat očekávanou hodnotu parametru letokruhu stromu (šířka, hustota atd.) jako funkci biologického věku (tj. doby od vzniku letokruhu) a výslednou růstovou křivku použít ke standardizaci jednotlivých řad letokruhů stromů. Tato metoda, která se nyní nazývá standardizace regionální křivky (RCS), byla poprvé navržena ve 30. letech 20. století (Grudd et al. 2002), později ji popsal Fritts (1976) a zpopularizoval ji Briffa et al. (1992). Kromě své teoretické přitažlivosti je metoda RCS vhodná pro získávání nízkofrekvenčních signálů v záznamech letokruhů stromů (Esper et al. 2003, Bunn et al. 2004) a je široce využívána při dendroklimatických rekonstrukcích povrchové teploty (Esper et al. 2002a, Gunnarson a Linderholm 2002, Naurzbaev et al. 2002).

REKONSTRUKCE TEPLoty

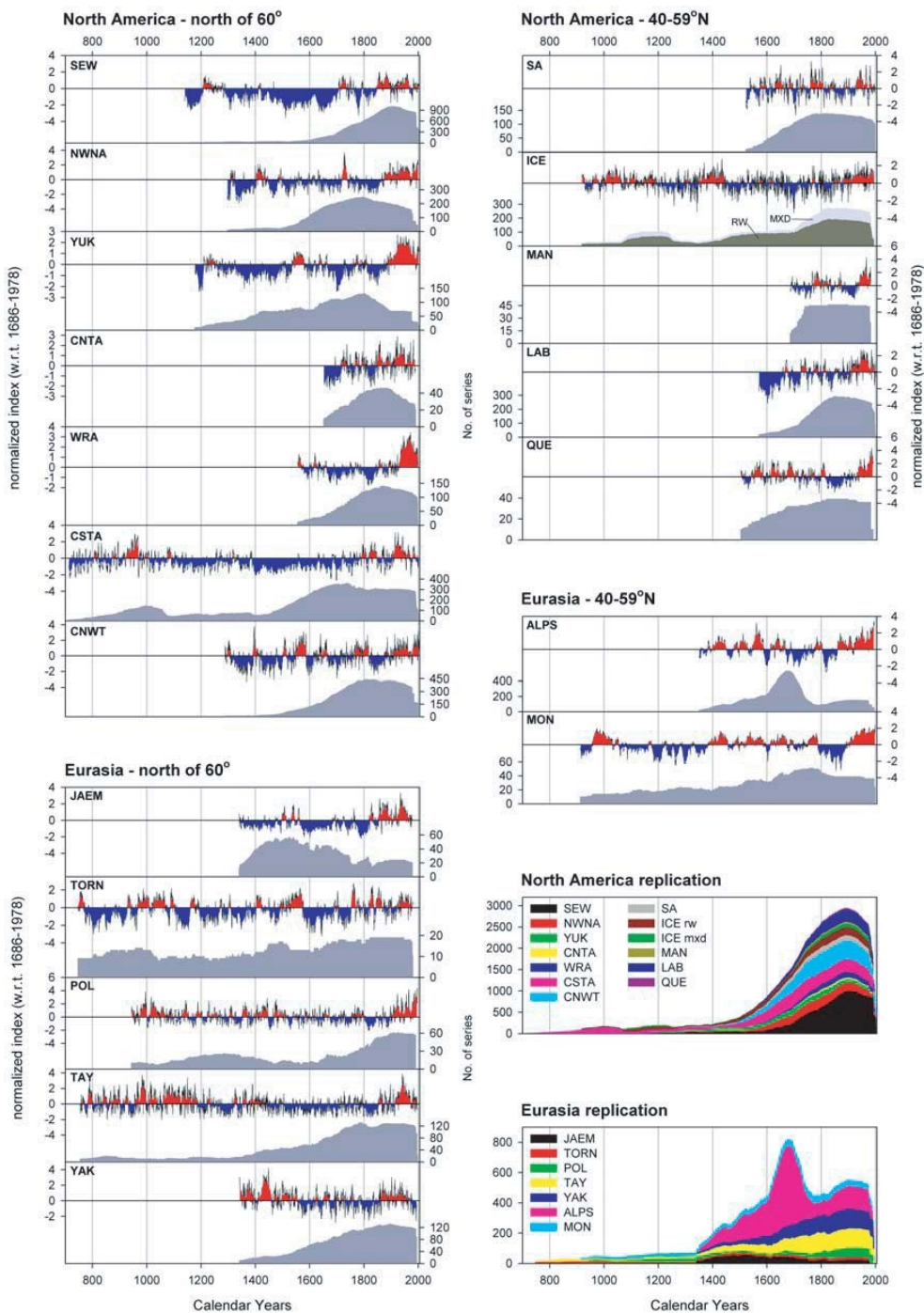
Aby se předešlo riziku, že by jedna chronologie letokruhů stromů mohla odrážet vliv lokálních neklimatických vlivů (Fritts 1976, Trotter et al. 2002), dendroklimatické re-konstrukce se často opírají o sítě chronologií lokalit. Regionální sítě letokruhů stromů obvykle vykazují silné korelace mezi lokalitami (např. Hughes et al. 1984, obr. 2) a sítě v kontinentálním až hemisférickém měřítku jsou schopny reprodukovat klimatické vzorce v synoptickém měřítku (Fritts 1991, Briffa et al. 2002). Pokud jsou dendroklimatické rekonstrukce povrchových teplot založeny na řadě lokalit na severní polokouli, ukazují, že oteplení ve 20. století bylo neobvyklé přinejmenším od roku 1500 (D'Arrigo et al. 2006; obr. 4-1 a 4-2), což je ve shodě s nezávislými rekonstrukcemi odvozenými z písemných dokumentů (Xoplaki et al. 2005), teplot ve vrtech (Pollack a Smerdon 2004) a délek ledovců (Oerlemans 2005a). Při hledání záznamů pro poslední dvě tisíciletí počet dostupných chronologií letokruhů stromů výrazně klesá (Hughes 2002), takže důvěra v rekonstruované vzorce se snižuje.

Všechny paleoklimatické rekonstrukce se opírají o "princip uniformity" (Camardi 1999), který předpokládá, že moderní přírodní procesy se v minulosti chovaly podobně, a je také diskutován jako předpoklad "stacionarity" v kapitole 9. Přestože limitující faktory řídily parametry letokruhů stromů v minulosti stejně jako dnes, je možné, že se role různých faktorů na jednom místě nebo v celé oblasti mohla v průběhu času měnit. Tato možnost byla vznesena jako vysvětlení "divergence" (tj,



OBRÁZEK 4-1 Mapa umístění jednotlivých lokalit (červeně) a regionálních kompozitů (žluté rámečky) použitých k rekonstrukci povrchových teplot severní polokoule za poslední tisíciletí. ZDROJ: D'Arrigo et al. (2006). Reprodukováno se souhlasem American Geophysical Union; copyright 2006. POZNÁMKA: ALPS = Alpy, CNTA = Centrální Aljaška, CNWT = Centrální severozápadní území, CSTA = Pobřežní Aljaška, ICE = Ledové pole, JAEM = Jaemmland, LAB = Labrador, MAN = Manitoba, MON = Mongolsko, NWNA = Severozápadní Aljaška, POL = Polární Ural, QUE = Quebec, SA = jižní Aljaška, SEW = Seward, TAY = Taymir, TORN = Tornetrask, WRA = Wrangells, YAK = Yaktutia, YUK = Yukon.

snížená korelace) mezi teplotou a parametry letokruhů (šířka a maximální hustota pozdního dřeva) během konce 20. století (Jacoby a D'Arrigo 1995, Briffa et al. 1998). Zdá se, že na Aljašce se zvyšující se teplota vzduchu v posledních desetiletích neodráží ve zvyšujícím se počtu záznamů letokruhů stromů, protože limitujícím faktorem se stala voda (tj. stres suchem) (Barber et al. 2000, Lloyd a Fastie 2002, Wilmking a Juday 2005). Na Sibiři se naopak snížená korelace chronologií letokruhů stromů s letní teplotou připisuje rostoucím zimním srážkám, které vedou k opožděnému tání sněhu v prostředí permafrostu, a tím ke zkrácení vegetační sezóny stromů (Vaganov et al. 1999). Pro sníženou korelaci mezi teplotou a chronologií letokruhů stromů byly formulovány i další hypotézy, jako například negativní vliv na růst stromů v důsledku většího ultrafialového záření, které se dostává k zemi jako



v důsledku řidnutí stratosférického ozonu (Briffa et al. 2004), nebo možnost, že povrchové přístrojové teploty jsou ovlivněny zkreslením směrem nahoru (Hoyt 2006). Výšková místa na hranici stromů v Mongolsku (D'Arrigo et al. 2001) a v evropských Alpách (Büntgen et al. 2005) nejsou ovlivněna "divergencí". Toto geografické oddělení potvrdili Cook et al. (2004), kteří rozdělili dlouhé záznamy stromových letokruhů pro severní polokouli do šířkových pásem a zjistili nejen to, že "divergence" je jedinečná pro oblasti severně od 55° s. š., ale také to, že rozdíl mezi severními a jižními lokalitami zjištěný po roce 1950 nemá obdoby nejméně od roku 900 n. l..

Zvláště vhodnou strategií pro minimalizaci rušivých vlivů je odebrání vzorků z lokalit podél ekologických gradientů, jako je nadmořská výška nebo zeměpisná šířka (Fritts a Swetnam 1989, Bugmann 1996). Například Naurzbaev et al. (2004) vybrali lokality podél šířkových (od 55 do 72° s. š.) a výškových (od 1120 do 2350 m n. m.) transektů a použili parametry regionální standardizační křivky k odvození klimatických vlivů a teplotní variability v minulosti. Pro zlepšení rekonstrukcí povrchové teploty pomocí stromových letokruhů jsou k dispozici i další strategie. Některé z těchto strategií zahrnují použití maximální teploty namísto průměrné teploty (Luckman a Wilson 2005), kombinaci více parametrů stromových letokruhů souvisejících s teplotou (Helle a Schleser 2004), odběr vzorků druhů s protichůdnými reakcemi na teplotu (Biondi et al. 1999) a použití mechanistických modelů na záznamy stromových letokruhů (Anchukaitis et al. 2006).

Možnost, že zvyšující se šířka letokruhů stromů v moderní době může být způsobena zvyšující se koncentrací oxidu uhličitého (CO₂) v atmosféře spíše než zvyšující se teplotou, poprvé navrhli LaMarche et al. (1984) pro borovici *dlouhověkou* (*Pinus longaeva*) v Bílých horách v Kalifornii. Ve stáří mohou tyto stromy nabývat formy "pruhové kůry", která se vyznačuje pruhem kmene, jenž zůstává živý a pokračuje v růstu i po odumření zbytku kmene. Takové stromy jsou citlivé na vyšší atmosférické koncentrace CO₂ (Graybill a Idso 1993), pravděpodobně kvůli větší efektivitě využití vody (Knapp et al. 2001, Bunn et al. 2003) nebo odlišnému rozdělení uhlíku mezi jednotlivé části stromu (Tang et al. 1999). Podpora přímého vlivu CO₂ na záznamy letokruhů stromů získaných z "celokorunných" stromů je méně přesvědčivá. Zvyšující se průměrná šířka letokruhů byla zaznamenána u *Pinus cembra* z centrálních Alp rostoucí hluboko pod hranicí stromové linie (Nicolussi et al. 1995). Údaje o obohacení volného vzduchu CO₂ (FACE) pro jehličnaté plantáže v Duke Forest (Hamilton et al. 2002) a na alpské hranici stromů (Hättenschwiler et al. 2002) rovněž ukázaly zvýšený růst stromů po vystavení atmosférické koncentraci CO₂ asi o 50 % vyšší než v současnosti. Na druhé straně nebyly nalezeny žádné přesvědčivé důkazy o takovém vlivu v záznamech letokruhů jehličnatých stromů ze Sierry Nevady v Kalifornii (Graumlich 1991) nebo Skalistých hor v Coloradu (Kienast a

OBRÁZEK 4-2 Výsledky jednotlivých regionálních složených chronologií pro lokality uvedené na obrázku 4-1. Časové řady byly volně seskupeny podle pásem zeměpisné šířky a normovány na společné období. Spodní dva panely v pravém sloupci ukazují seskupené replikační grafy pro Severní Ameriku i Eurasii. Definice zkratk viz obrázek 4-1. ZDROJ: D'Arrigo et al. (2006). Reprodukováno se souhlasem American Geophysical Union; copyright 2006.

Luxmoore 1988). Další důkaz pochází z nedávného přehledu údajů o dospělých stromech ve čtyřech klimatických zónách, který dospěl k závěru, že růst borovice v horní části stromové linie je omezen jinými faktory než uhlíkem (Körner 2003). Zatímco pro teplotní rekonstrukce je třeba se vyhnout vzorkům "strip-bark", pozornost by měla být věnována také zakládajícím účinkům antropogenní depozice dusíku (Vitousek et al. 1997), protože živinové podmínky v půdě určují reakci růstu dřeva na zvýšený atmosférický CO₂ (Kostiainen et al. 2004). Nicméně v lesních oblastech pod hranicí stromového patra, kde lze očekávat, že moderní vstup dusíku ovlivní dendroklimatické záznamy, jako je Skotsko (Hughes et al. 1984) a Maine (Conkey 1986), byl vztah mezi teplotou a parametry letokruhů stromů v čase stabilní.

Závěrem lze říci, že věda o letokruzích stromů poskytuje užitečné poznatky o proměnlivosti teplot v minulosti. Slibné oblasti současného a budoucího výzkumu lze shrnout takto:

- aktualizace chronologií lokalit, které byly shromážděny před 20-30 lety,
- zvýšení počtu a geografického pokrytí teplotně citlivých chronologií letokruhů stromů starších než 1 000 let,
- kvantifikace přesnosti a správnosti nízkofrekvenčních teplotních signálů,
- provádění experimentálních studií biofyzikálních vztahů mezi teplotou a parametry letokruhů stromů a
- zpřesnění mechanistických modelů vlivu teploty na parametry letokruhů stromů v různých prostorových a časových měřítkách.

5

Mořské, jezerní a jeskynní vzorky

- Roční záznamy o korálech ukazují na oteplování a/nebo osvěžování povrchové mořské vody v průběhu minulého století na většině tropických lokalit, jakož i na posuny směrem k teplejším a/nebo čerstvějším vodám v polovině 19. století a mezi lety 1920 a 1940.
- Záznamy severoatlantických sedimentů z Labradorského moře, Bermudské výšiny a pobřeží Afriky ukazují středověké oteplování a ochlazování během malé doby ledové.
- Korály a mořské sedimenty poskytují informace o povrchové teplotě v jinak málo probádaných oceánských oblastech. Rašeliny a jezerní bahno, které obsahují mikrofosílie organismů citlivých na klima, a jeskynní kalcitové usazeniny poskytují informace o klimatických událostech, které ovlivnily suchozemské oblasti.
- Ačkoli záznamy z mořských, jezerních a jeskynních proxy mohou být ročně pásmové, mnohé z proxy, o nichž pojednává tato kapitola, mají pouze meziroční až dekadové rozlišení, a přispívají tak především k popisu nízkofrekvenční proměnlivosti minulého klimatu.
- Mnoho záznamů diskutovaných v této kapitole je citlivějších na změny hydrologických faktorů než na změny povrchové teploty. Změny ve srážkách se často shodují s rozsáhlejšími změnami klimatu, ačkoli neexistuje žádný konzistentní globální vztah mezi studenými/vlhkými a teplými/suchými podmínkami nebo naopak. Množství používané jako zástupný ukazatel teploty ve většině dosavadních studií korálů je také ovlivněno změnami v poměru izotopů mořské vody, i když novější techniky toto omezení řeší.

CORALS

Masivní koráli, kteří žijí v blízkosti mořské hladiny, vytvářejí každoročně husté pásy aragonitu (uhličitanu vápenatého), z nichž lze odebírat vzorky a na základě jejich geochemického složení rekonstruovat měsíční klimatické záznamy. Zejména poměr ^{18}O a ^{16}O (běžně označovaný jako $\Delta^{18}\text{O}$)¹ v korálovém aragonitu klesá s rostoucí teplotou mořské vody a s klesajícím $\Delta^{18}\text{O}$ ve vodě v době vzniku. $\Delta^{18}\text{O}$ ve vodě často silně koreluje se salinitou. Proto lze hodnoty $\Delta^{18}\text{O}$ z korálu, který vyrostl v otevřeném oceánu, použít k rekonstrukci kombinovaného signálu teploty povrchu moře (SST) a salinity pro danou oceánskou oblast. Lokality pro odběr vzorků korálů se vybírají na základě blízkosti otevřeného oceánu a obecně dobře propláchnutých míst. Největší koráli se obvykle nacházejí v závětrných místech, která jsou minimálně ovlivněna bouřemi a naplaveninami. Morfologie korálové hlavy by měla vykazovat zaoblený tvar s minimální erozí na bázi způsobenou zavrtávajícími se organismy nebo fyzickým poškozením. Ve většině případů se z každé lokality odebírá více než jeden vzorek korálu, aby se získal co nejdéší záznam. V ideálním případě by se rekonstrukce na základě korálů zakládaly na více jádrech z téže lokality, ale v praxi bylo takto podrobně prozkoumáno jen málo lokalit (výjimku viz Hendy et al. 2002). Běžněji jsou korálové rekonstrukce úzce kalibrovány s instrumentálními daty a vysoké korelační koeficienty dodávají rekonstrukci minulých podmínek důvěru (přehled viz Gagan et al. 2000, Cole 2003). Hlavním omezením použití korálového $\Delta^{18}\text{O}$ pro rekonstrukci SST je přidaná proměnná $\Delta^{18}\text{O}$ vody, která je důležitá v oblastech s vysokým množstvím srážek, výparu nebo říčních vstupů, jako je teplá oblast západního Pacifiku. Nedávno bylo zjištěno, že toto omezení lze překonat současným měřením prvkového poměru stroncia a vápníku (označovaného Sr/Ca) v korálových pásmech, protože poměr Sr/Ca se mění především v závislosti na SST. Bylo prokázáno, že poměr Sr/Ca kvantitativně sleduje SST s vysokou mírou přesnosti (Beck et al. 1992), což dává nejistotu v rekonstrukcích SST menší než 0,3 °C. K dispozici je několik dlouhodobých rekonstrukcí SST pomocí poměru Sr/Ca korálů, včetně Velkého bariérového útesu (Hendy et al. 2002), Rarotongy a Fidži (Linsley et al. 2004), Madagaskaru (Zinke et al. 2004) a Havaje (Druffel et al. 2001). Několik studií také použilo uran/vápníku (U/Ca) k rekonstrukci SST (např. Hendy et al. 2002).

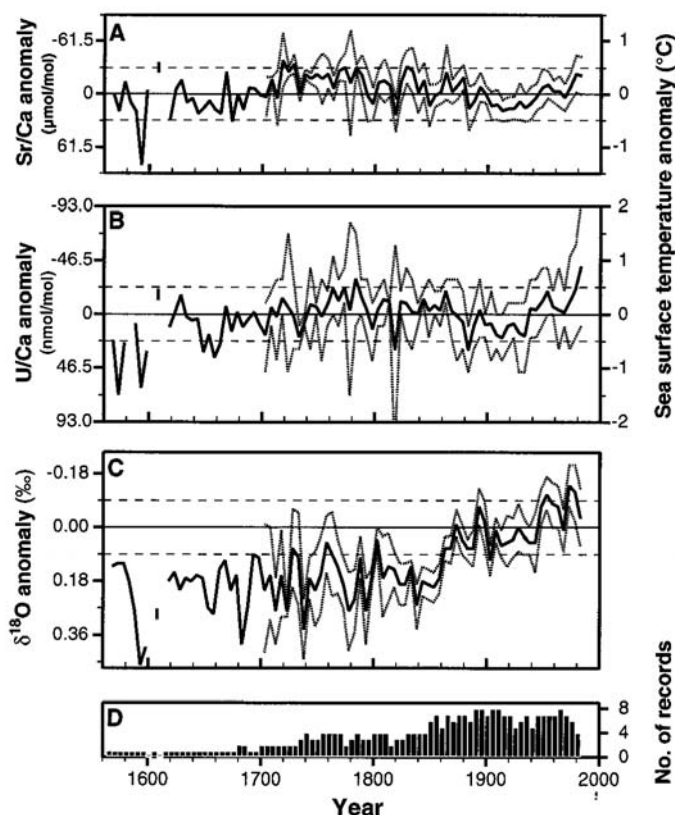
Výsledky rekonstrukcí na základě korálů

Pro tropické a subtropické oblasti Tichého, Indického a Atlantského oceánu jsou k dispozici kontinuální záznamy $\Delta^{18}\text{O}$ korálů za posledních 100-400 let (viz souhrnné práce: Cole 2003, Lough 2004, Gagan et al. 2000). Korály z většiny těchto lokalit vykazují celkový pokles hodnot $\Delta^{18}\text{O}$ směrem k 20. století, což svědčí o teplejší, čerstvější (nižší salinita) nebo obojí povrchové mořské vodě. Většina těchto záznamů také vykazuje náhlé posuny směrem k teplejším/svěžejším vodám během poloviny 20. století.

¹ $\Delta^{18}\text{O}$ vzorku je definováno takto:

$$\Delta^{18}\text{O} = ((R_{\text{samp}} - R_{\text{std}})/R_{\text{std}}) \times 1000$$

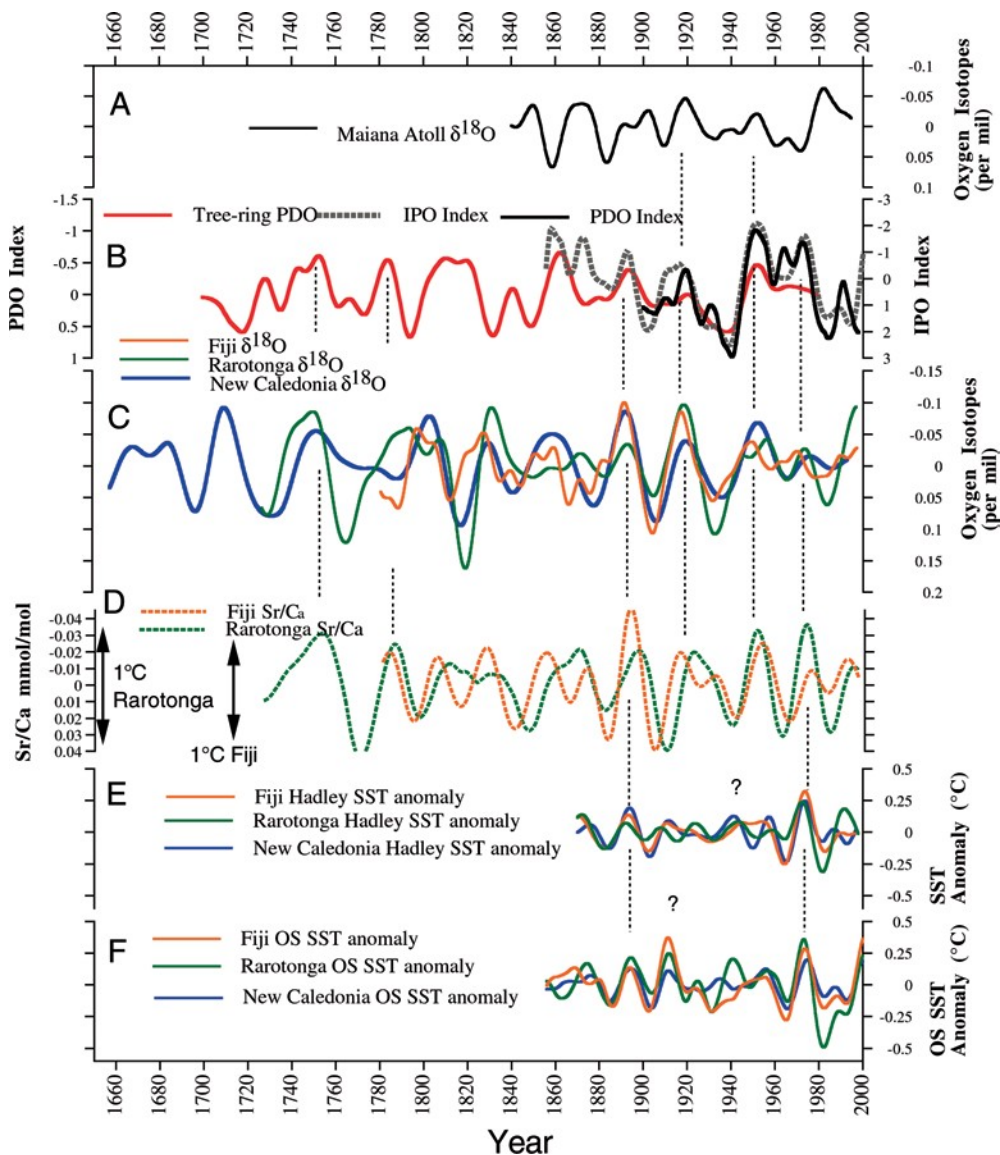
kde R_{samp} je poměr $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ve vzorku a R_{std} je poměr $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ v referenčním standardu.



OBRÁZEK 5-1 Anomálie Sr/Ca, U/Ca a $\Delta 18\text{O}$ z kompozitů Velkého bariérového útesu; anomálie Sr/Ca a U/Ca byly použity k rekonstrukci místních záznamů SST pro pětileté průměry, přičemž 95procentní statistické intervaly spolehlivosti jsou vyznačeny tečkovanými čarami. ZDROJ: Hendy et al. (2002). Přetištěno se svolením AAAS; copyright 2002.

19. století a v letech 1920 až 1940, z nichž poslední se shoduje s přístrojovými záznamy (Gagan et al. 2000). V návaznosti na nedávné oteplení oceánů vykazují některé lokality výrazné vzorce dekádové variability s opakovanými posuny o několik desetin stupně Celsia.

Obrázky 5-1 a 5-2 ukazují příklady izotopových a prvkových záznamů získaných z korálů. Na základě poměrů Sr/Ca a U/Ca v osmi korálových jádrech z Velkého bariérového útesu Hendy et al. (2002) (obr. 5-1) odhalili, že nadprůměrné hodnoty SST byly přítomny v 18. a 19. století, s ochlazením na počátku 20. století a oteplením až do 80. let 20. století (více u výsledků U/Ca). Jiné záznamy korálů z jihozápadního Pacifiku (obr. 5-2) vykazují interdekadální změny hodnot $\Delta 18\text{O}$ a Sr/Ca, které odrážejí jak SST, tak změny cirkulace v blízkosti jihopacifické konvergenční zóny (Linsley et al. 2004). Tito autoři dospěli k závěru, že míra křížové



OBRÁZEK 5-2 (A-F) Srovnání interdekadální variability geochemických záznamů korálů *Porites* z Rarotongy (Linsley et al. 2000), Fidži a Nové Kaledonie (Quinn et al. 1998) a atolu Maiana (Urban et al. 2000). Dlouhodobý trend byl ze všech dat odstraněn; oteplování během 20. století tak není patrné. Zobrazeny jsou také instrumentálně založené indexy interdekadální pacifické oscilace (IPO) (Folland et al. 2002) a pacifické dekadální oscilace (PDO) (Mantua et al. 1997) spolu se severoamerickým indexem PDO založeným na stromových letokruzích D'Arrigo et al. (2001) a údaji o SST z Rarotongy, Fidži a Nové Kaledonie ze dvou různých datových souborů (HADISST1 a Kaplan et al. [1998]). ZDROJ: Linsley et al. (2004). Přetištěno s laskavým svolením Springer Science and Business Media; copyright 2004.

hemisférická symetrie mezidekádní oceánografické variability se v průběhu času měnila, přičemž v polovině 18. století byla korelace mezi severním a jižním Pacifikem nižší.

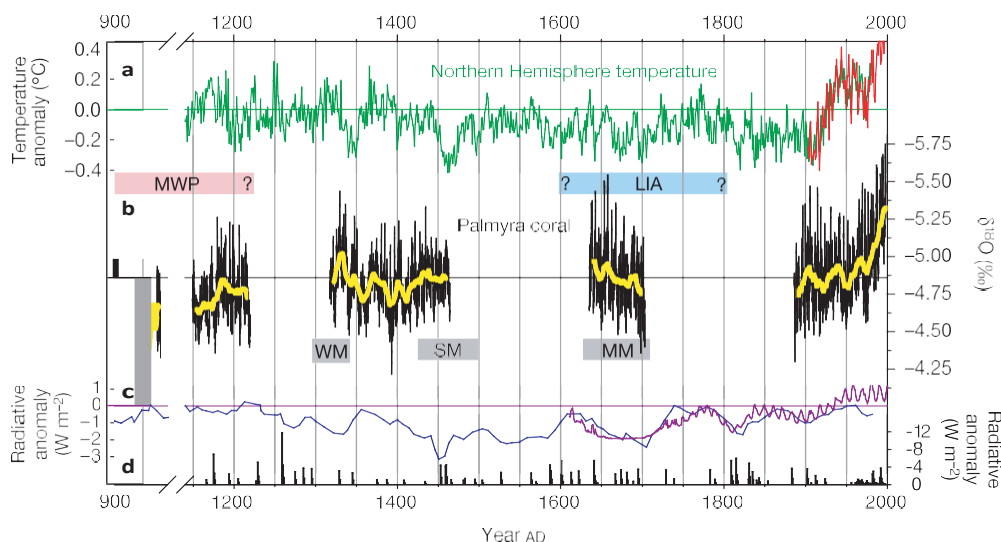
Ve východním tropickém Pacifiku, kde v klimatologii převládají jevy spojené s oscilací El Niño-Southern Oscillation (ENSO), odrážejí záznamy korálů především proměnlivost teploty severní šířky a do roku 1954 nedošlo k žádnému posunu směrem k nižším hodnotám $\Delta 18\text{O}$ (teplejší teplota severní šířky) (Dunbar et al. 1994). Další izotopové a prvkové záznamy z korálů v této oblasti rovněž prokazují výskyt těchto událostí (Shen et al. 1992, Guilderson a Schrag 1998, Druffel 1981). V západní části Indického oceánu prokazují $\Delta 18\text{O}$ korálů ze Seychel (Charles et al. 1997) a Malindi v Keni (Cole et al. 2000) zvýšení SST o $0,6\text{ }^\circ\text{C}$ od poloviny 19. století do roku 1980; přerušované záznamy z Madagaskaru ukazují na chladné podmínky v letech 1675 až 1760 a teplé podmínky v letech 1880 až 1900 a 1973 až 1995 (Zinke et al. 2004). Zdá se, že vliv a povaha cyklů ENSO v této oblasti se během tohoto posledního teplého období změnily. V jihovýchodní části Indického oceánu naznačují záznamy o korálovém $\Delta 18\text{O}$ nárůst SST o $0,6\text{ }^\circ\text{C}$ od roku 1944 a další nárůst o půl stupně od roku 1795 (Kuhnert et al. 1999). A konečně údaje o $\Delta 18\text{O}$ z bermudských korálů naznačují mírný posun k vyšší SST, zatímco údaje o jiných poměrech izotopů ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ a $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$) ukazují, že míchání v horních vrstvách oceánu bylo během 19. a 20. století proměnlivé (Nozaki et al. 1978; Druffel 1989, 1997). Záznamy korálů z Floridy a Karibského moře vykazují změny $\Delta 18\text{O}$, které odrážejí určitou kombinaci změn SST a hydrologie (Druffel 1981, Winter et al. 2000, Swart et al. 1996).

Vyhledky na zlepšení a rozšíření korálových rekordů

Pro získání rozsáhlých, víceletých rekonstrukcí SST založených na poměru Sr/Ca je nutné získat dlouhé záznamy o poměru Sr/Ca v korálech pro mnohem větší počet lokalit, než je v současnosti k dispozici. Měření uranu a thoria umožňují získat kratší záznamy za posledních několik tisíciletí, které by osvětlily proměnlivost klimatu tropických a subtropických oceánů. Cobb et al. (2003) uvedli záznam $\Delta 18\text{O}$ pro část posledních 1 100 let z fosilních korálů na atolu Palmyra ve středním tropickém Pacifiku. Jak ukazuje obrázek 5-3, zjistili relativně chladné a suché klimatické podmínky v 10. století až po stále teplejší a vlhčí klima ve 20. století. Bylo zjištěno, že aktivita ENSO byla nejintenzivnější v polovině 17. století než v ostatních zkoumaných obdobích. Ačkoli tyto údaje nepředstavují problém, při studiu korálů je třeba vzít v úvahu možnost diagenetických změn fosilních segmentů.

Sklerospongy a měkkýši

Sklerospongy obývají mělké tropické jeskyně a vylučují aragonit velmi nízkou rychlostí růstu ($0,1\text{--}0,2$ milimetru za rok); relativně malé exempláře mohou být staré více než 1000 let. Poměry Sr/Ca měřené ve vrstvách sklerospongy vykazují korelaci s SST (Rosenheim et al. 2004). Dlouhověké schránky, jako je škeble *Arctica islandica*, žijí v chladných povrchových vodách a nasazují roční růstové pásy. Ačkoli jsou slibné (Forsythe et al. 2003), dosud dostupné záznamy $\Delta 18\text{O}$ a geochemické záznamy měkkýšů jsou příliš krátké na to, aby mohly být použity pro dlouhodobou rekonstrukci SST.



OBRÁZEK 5-3 Kompozice z Cobb et al. (2003) zobrazující rekonstruované teplotní anomálie severní polokoule (Mann et al. 1999), hodnoty $\delta^{18}\text{O}$ odvozené z fosilních korálů v Palmyře, anomálie slunečního záření (Lean et al. 1995, Bard et al. 2000) a jeden odhad anomálie radiačního působení (Crowley 2000). ZDROJ: Cobb et al. (2003). Přetištěno se souhlasem Macmillan Publishers Ltd.; copyright 2003.

MOŘSKÉ SEDIMENTY

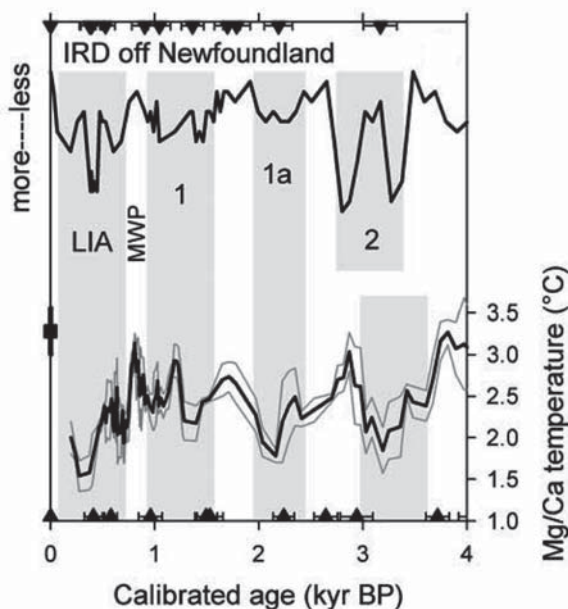
Využitelnost mořských sedimentů pro zaznamenání klimatických změn v holocénu závisí buď na dostatečně rychlé akumulaci sedimentů, která překoná vliv bioturbace na míchání² (obvykle do 8 cm), nebo na ukládání za anoxických či suboxických oceánských podmínek, aby se zachovaly roční vrstvy. Oba typy depozičního prostředí byly využity při pokusech odvodit oceánské a atmosférické podmínky ovlivňující záznam v sedimentech.

Několik studií mořských sedimentů umožnilo nahlédnout do minulého klimatu na regionální úrovni. Povodí Cariaco u Venezuely je anoxická pánev s ročními vrstvami odrážejícími změny atmosférických podmínek, které doprovázejí posuny polohy intertropické konvergenční zóny (ITCZ), zejména polohy a intenzity srážek. Haug et al. (2003) studovali změny koncentrace titanu v ročních vrstvách sedimentů v pánvi Cariaco, aby odvodili změny v ITCZ, které ovlivnily srážky na poloostrově Yucatán. Záznamy jsou poněkud nejednoznačné při definování malé doby ledové nebo teplého období ve středověku, ale autoři se domnívají, že naznačují několik epoch velkého sucha na počátku středověku

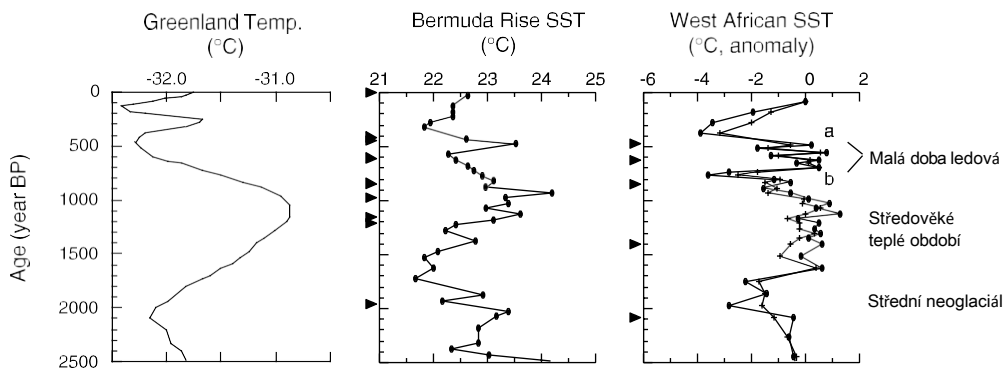
²Bioturbace je promíchávání sedimentů organismy žijícími na dně (viz např. Turekian et al. 1978).

kteřé způsobily kolaps klasické mayské civilizace. Black et al. (1999) prokázali, že desetileté až víceleté změny větrného proudění v pánvi Cariaco, a tím i střední polohy ITCZ, úzce souvisely s teplotou teplého vzduchu v severním Atlantiku v posledních osmi stoletích. Další záznamy z oblastí upwellingu u Pákistánu (např. von Rad et al. 1999) a zón vrstevnatých sedimentů usazených v anoxických podmínkách - jako jsou fjordy podél pobřeží Britské Kolumbie v Kanadě - rovněž disponují mořskými sedimenty s výraznými sezónními vrstvami, které nabízejí historii pozdně holocenního klimatu s vysokým rozlišením.

Záznamy z rychle se hromadících sedimentů v Atlantickém oceánu rovněž poskytují informace o změnách teploty za posledních 2 000 let. Teplotní proxy odvozené z bentických a planktonních foraminifer v severozápadní části Atlantského oceánu (Keigwin a Pickart 1999, Marchitto a deMenocal 2003), v Bermudské výšce (Keigwin 1996, Keigwin a Boyle 2000) a u západního pobřeží Afriky (deMenocal et al. 2000), stejně jako z mořských diatomů (řas s křemičitými schránkami; Jiang et al. 2002), všechny odhalují změny povrchových teplot oceánu nebo teplot povrchového oceánu přenášených do hloubky klesajícími vodními masami. Tyto záznamy v různé míře odhalují jak malou dobu ledovou, tak teplé období kolem středověku (obr. 5-4 a 5-5). Předpokládá se, že holocenní klimatické změny, které naznačují vrcholy v ledových



OBRÁZEK 5-4 Variace teploty dna Labradorského proudu odvozené z poměru Mg/Ca ve foramách a vztah k míře ledovcových trosek (IRD) ukazující variace teplotních změn v severním Atlantiku, jak se odrážejí v hlubokomořských sedimentech. ZDROJ: Marchitto a deMenocal (2003). Reprodukováno se souhlasem American Geophysical Union; copyright 2003.



OBRÁZEK 5-5 Teplota v Grónsku (Dahl-Jensen et al. 1998), SST na Bermudách (Keigwin 1996) a SST v západní Africe za posledních 2 500 let. ZDROJ: deMenocal et al. (2000). Přetištěno se souhlasem AAAS; copyright 2000.

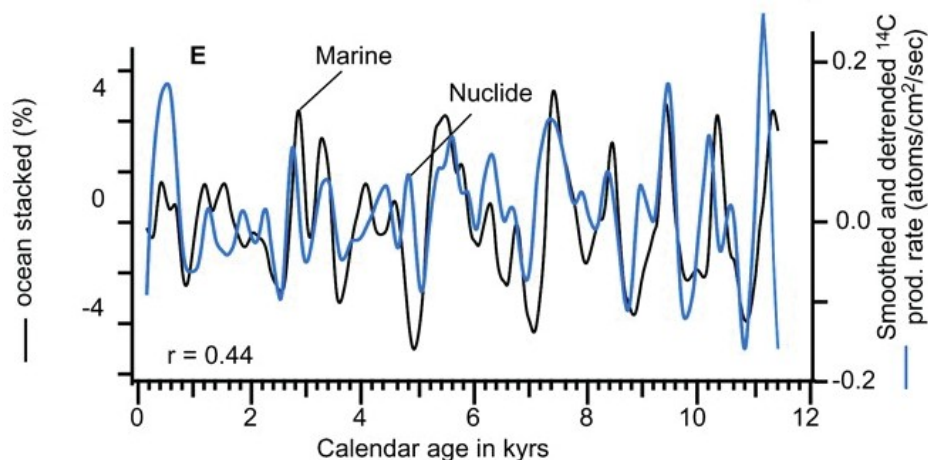
množství litických zrn v několika severoatlantických jádrech bylo určeno kolísáním slunečního záření (Bond et al. 1997, 2001) (obr. 5-6).

Kromě toho je rychlost sedimentace v některých ústích řek a na pobřeží dostatečně rychlá, aby umožnila rekonstrukci klimatu za posledních 2 000 let. Cronin et al (2003) použili paleotermometrii Mg/Ca na mikrofossilních schránkách, aby prokázali teplotní posuny o 2 až 4 °C v zálivu Chesapeake, včetně chladných výkyvů během malé doby ledové a teplejších období během středověku (přibližně 800 až 1300 n. l.). Vzhledem ke znečištění ústí řeky spojenému s odlesňováním od poloviny 19. století může nejnovější část tohoto záznamu odrážet jiné faktory než teplotu vody.

JEZERNÍ A RAŠELINOVÉ SEDIMENTY

V mnoha jezerech obsahují sedimenty odlišné sezónní vrstvy neboli varvy, které jsou buď biogenního (např. karbonátové, diatomické křemeny a organické látky), nebo minerogenního (střídání hrubozrnných a jemnozrnných částic) původu. Oba typy sedimentů potenciálně umožňují roční datování sekvencí, které zahrnují mnoho tisíciletí, i když obvykle s chrono- logickou chybou několika procent (Zolitschka 2003). Biologie a chemismus jezerní vody jsou často citlivé na teplotu, ale ovlivňují je i další faktory, jako jsou srážky, využití půdy v povodí a atmosférické znečištění. Pro získání jednoznačných klimatických signálů z jezerních záznamů si výzkumníci často vybírají lokality v odlehlých místech, například ve Vysoké Arktidě. Například letní období bez ledu v arktických kanadských jezerech je velmi citlivé na teplotu, což se zase projevuje v tloušťce a charakteru sezónních varů (Lamoureux a Bradley 1996).

Jezera v tropických a suchých oblastech jsou obvykle citlivější na vodní bilanci než na teplotu *jako takovou*. Záznamy jezerních sedimentů proto představují jeden z klíčových přírodních archivů pro rekonstrukci historie sucha a záplav v regionech, jako je středozápad USA (Laird et al. 1998), a také dlouhodobých změn aktivity ENSO (Rodbell et al. 1999). Analýza stabilních izotopů v sekvenci varvovaných jezer podle

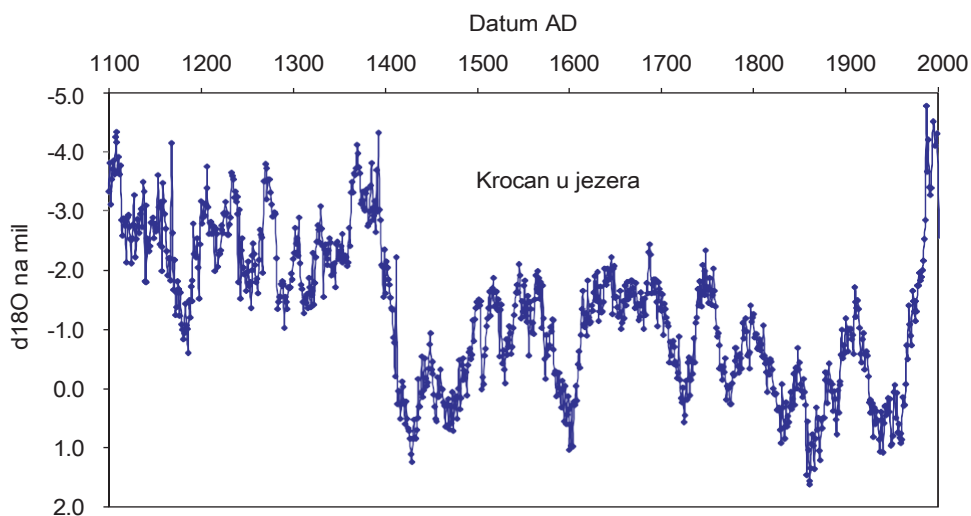


OBRÁZEK 5-6 Vztah mezi koncentrací ledových trosek (podle koncentrace železa [Fe]) a tokem kosmogenního ^{14}C . ZDROJ: Bond et al. (2001). Přetištěno se svolením AAAS; copyright 2001.

Jones et al. (2006) prokázali zvýšené (tj. pozitivnější) hodnoty $\Delta^{18}\text{O}$ odpovídající malé době ledové a snížené (tj. negativnější) hodnoty $\Delta^{18}\text{O}$ před rokem 1400 (obr. 5-7). Primární vliv na tento a podobné záznamy o jezerech však neměla teplota *jako taková*, ale intenzita sucha, která v tomto případě souvisí s intenzitou letního monzunu nad jižní Asíí, a srážky, které jsou zde určovány zimní atmosférickou cirkulací nad severním Atlantikem. Přestože východní Středomoří bylo během malé doby ledové relativně suché, nízké hladiny jezer ve východní Africe a Severní Americe naznačují, že sucha v těchto oblastech byla ve středověku extrémnější než ve 20. století, což pravděpodobně souviselo se změnami sluneční aktivity (Hodell et al. 2001, Verschuren et al. 2000).

Biologické pozůstatky

Fosilní pozůstatky ze suchozemských sedimentů rovněž vypovídají o teplotách na povrchu v minulosti. Larvy nekoušoucích mušek (chironomidů) a některé druhy brouků jsou velmi citlivé na teplotu a tvrdé části obou organismů se zachovaly v jezerních a rašelinných sedimentech. Hlavní uplatnění těchto záznamů se však doposud týkalo časových úseků delších než posledních 2 000 let. V rašeliništích jsou druhy améb tvořící varlata citlivé na hloubku hladiny podzemní vody, která je zase obecně kontrolovatelná jak srážkami, tak teplotou. Charman et al. (2006) použili rekonstruované změny hladiny podzemní vody k sestavení historie klimatu s dekádním rozlišením za posledních 4 000 let v severní Británii. Pylová analýza je klíčovou technikou pro dlouhodobější klimatickou a vegetační historii, ale neposkytuje klimatická data s dostatečnou časovou přesností a spolehlivostí, aby mohla přímo pomoci při rekonstrukci teploty za poslední dva



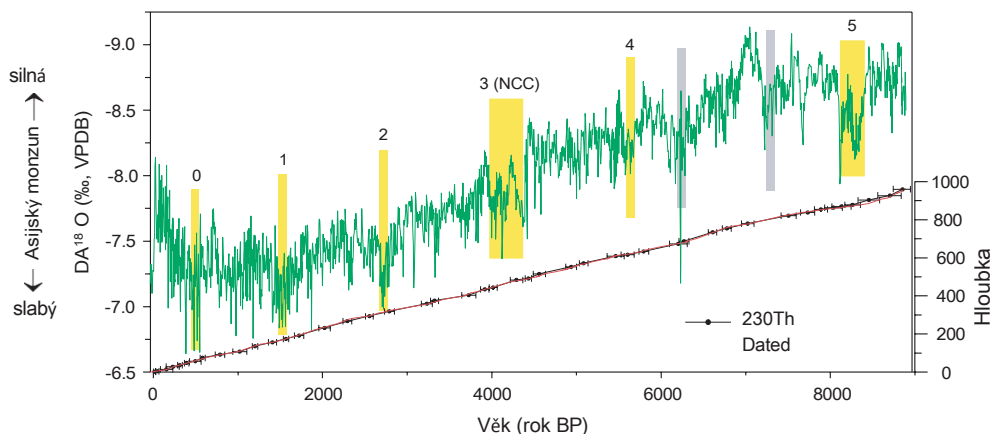
OBRÁZEK 5-7 Roční záznam izotopů kyslíku za posledních 900 let z karbonátů varvaných kráterových jezer ve východním Středomoří. ZDROJ: Upraveno podle Jones et al. (2006). Přetištěno se svolením; copyright 2006.

tisíciletí, částečně proto, že vegetace, která produkuje pyl, reaguje na klimatické vlivy se zpožděním.

Kalibrační přístup použitý pro všechny tyto organismy je založen na moderních tréninkových souborech, nikoliv na porovnávání s minulými teplotními změnami v záznamu. Minimálně asi 30 lokalit je analyzováno podél klimatického gradientu pro jejich současnou druhovou skladbu (např. diatomy v povrchovém bahně) a pro řadu environmentálních měření (pH, salinita, teplota vody, vzduchu atd.). Tyto moderní trénovací soubory se pak používají ke kalibraci minulých druhových společenstev zachovaných v sedimentárních jádrech pomocí vícerozměrných statistických technik založených na regresi (Birks 1998). Pomocí tohoto přístupu bylo zjištěno, že sladkovodní diatomy z alpských jezer sledují pH jezerní vody, které zase sledovalo teploty 20. století (Koinig et al. 1998).

SPELEOTHEMS

Speleotémy jsou jeskynní usazeniny, například stalagmity. Zaznamenávají změny vnějšího klimatu prostřednictvím řady různých ukazatelů, včetně intenzity luminiscence, rychlosti růstu a chemického složení prvků a izotopů (McDermott et al. 1999, Lauritzen 2003). Speleotémový uhlíkatý vápenatý zaznamenává měnící se izotopové složení podzemní vody v jeskyni spolu s teplotou v jeskyni. Usazeniny uhlíkatu vápenatého rostou ve stalagmitech radiálně i vstupně a záznamy ročních izotopických změn, jako je $\delta^{18}\text{O}$, lze chronologicky vyhodnotit přesnými datovacími technikami (např. poměr uranu a thoria) a následně převést na klimatický signál. Takové záznamy představují kom-



OBRÁZEK 5-8 $\Delta^{18}\text{O}$ v průběhu holocénu z jeskyně ve východní Asii. Žlutě číslované pásy odpovídají časům ledových trosek v severním Atlantiku, které jsou znázorněny na obr. 5-6 (Bond et al. 2001). ZDROJ: Wang et al. (2005b). Přetištěno se souhlasem AAAS; copyright 2005.

kombinovaný signál teploty a srážek - spolu se změnami zdrojové oblasti - ale každý z těchto signálů může být v různých podmínkách dominantní. V tropických a suchých oblastech je množství srážek obvykle hlavním faktorem určujícím obsah $\Delta^{18}\text{O}$ v jeskynních karbonátech (Bar-Matthews et al. 2003). Záznamy izotopů kyslíku získané z jeskyní v jižní Číně (Wang et al. 2005b) (obr. 5-8) a Ománu (Fleitmann et al. 2003) tak naznačují, že v posledních několika tisících letech došlo k výrazným klimatickým změnám v intenzitě asijských monzunů. Epizodické submileniální výkyvy v rámci těchto holocenních záznamů obecně odpovídají vzorci severoatlantických ledových ker, který uvádí Bond et al. (2001). Korelace speleotémových záznamů z jeskynních lokalit spojených s asijskými monzuny s mořským záznamem postupu a ústupu ledu v severním Atlantiku poskytuje náznak klimatických změn v měřítku celé polokoule, které se projevují různě lokálně.

V některých chladných a vlhkých oblastech může být signál teploty v jeskynních dominantní při kontrole $\Delta^{18}\text{O}$ a dalších měření, což je obzvláště cenné, protože teplota v jeskynních je stabilní po celý rok a představuje průměrnou roční teplotu vnějšího prostředí. Moderní vlastnosti speleotém byly použity ke kalibraci jeskynních sekvencí ze severní Skandinávie z hlediska holocenní teplotní variability (Lauritzen a Lundberg 1999). Některé speleotémy navíc obsahují roční pásy podobně jako jezerní varvy nebo růstové letokruhy stromů a ty umožnily měření izotopových změn v jeskynních během posledních 2 000 let s velmi vysokým rozlišením. Proctor et al. (2000, 2002) použili jeden takový záznam ze severního Skotska k rekonstrukci ročních až dekádních klimatických změn v severním Atlantiku během posledních tří tisíciletí.

SHRNUTÍ

Hlavní výhodou záznamů popsaných v této kapitole je možnost provádět mnoho různých typů laboratorních analýz na stejných profilech. Tyto vícenásobné profily - fyzikální, biologické nebo chemické - mohou mít různé a nezávislé základy pro klimatickou kalibraci; zahrnují použití moderních tréninkových souborů, studií sedimentových pastí a historické kalibrace. Některé, ale ne všechny mořské, jezerní, rašelinové a jeskynní záznamy mají roční časové rozlišení. Ty, které nemají roční datování, mohou být přesto schopny zachytit nízkofrekvenční výkyvy klimatu (Moberg et al. 2005b). Hlavním problémem v těchto případech je zajistit, aby záznamy byly přesně datovány a korelovány, protože pokud tomu tak není, složené záznamy budou mít tendenci vyhlazovat skutečnou variabilitu teplot.

6

Izotopy ledu

- Analýzy stabilních izotopů v ledovcovém ledu poskytují záznamy o změnách klimatu s vysokým rozlišením v dlouhých časových obdobích. V nízkých zeměpisných šířkách je tento signál kombinací teplotních a hydrologických proměnných. V polárních ledových příkrovech je tento signál řízen především teplotou.
- Izotopové záznamy z Tibetu a And ukazují, že klima 20. století bylo neobvyklé ve srovnání s předchozími 2000 lety. Současné poznatky nám neumožňují přísně oddělit teplotní část tohoto signálu, ale všechny důkazy naznačují, že se Tibet v minulém století oteplil. Změny klimatu v Andách mají v prostoru a čase zákonitosti, které dosud nejsou pochopeny.
- V Grónsku bylo kolem roku 1000 n. l. výrazné období oteplení, v letech 1600 až 1900 chladné období a ve 20. století mírné oteplení. Některá pobřežní místa v Antarktidě vykazují oteplení ve 20. století, ale místa ve vnitrozemí nikoli. Žádné antarktické lokality nevykazují oteplení v období středověku.

Měření izotopových poměrů kyslíku a vodíku v ledovcových jádrech, neboli izotopových poměrů ledu, jsou důležitým teplotním ukazatelem, který poskytuje kontinuální záznamy s vysokým rozlišením o klimatických změnách teploty v místech s trvalou akumulací sněhu a nízkými teplotami.¹ Izotopové záznamy poskytují informace o klimatu, protože atmosférická vlhkost přenášená na chladné ledovce se při ochlazení vzdušné masy destiluje srážkami. Tato destilace se kombinuje s teplotní závislostí izotopových separací.

¹V tomto kontextu se izotopový poměr ledu vztahuje na stabilní izotopové složení molekul kyslíku a vodíku, z nichž se led skládá.

během tvorby sněhu, aby se vytvořil signál izotopového poměru ledu. Oba tyto faktory sílí se snižující se teplotou, a proto je korelace izotopového poměru ledu s teplotou v chladných vnitřních částech polárních ledovců velmi silná. Záznamy izotopového poměru ledu jsou geograficky omezeny na místa s významnou tloušťkou ledu, konkrétně na polární oblasti a vysokohorská pohoří v jiných oblastech. Je pozoruhodnou náhodou, že vysoké Andy, tibetská a himálajská pohoří a velké sopky východní rovníkové Afriky nabízejí vůbec nějaké záznamy o ledu v nízkých zeměpisných šířkách Země.

FYZIKÁLNÍ ZÁKLAD PRO ODVOZENÍ KLIMATICKÝCH SIGNÁLŮ ZE ZÁZNAMŮ IZOTOPICKÝCH POMĚRŮ V LEDU.

Teplotní závislost izotopového poměru ledu vyplývá z fundamentální fyziky na molekulární úrovni v kombinaci s geofyzikálními procesy na planetární úrovni (Dansgaard 1964, Kavanaugh a Cuffey 2003). Další vlivy na izotopový poměr ledu však mohou být významné (Dansgaard 1964, Pierrehumbert 1999, Alley a Cuffey 2001, Kavanaugh a Cuffey 2003, Jouzel et al. 1997), a proto musí být měření izotopového poměru ledu kalibrováno na základě nezávislých informací o teplotě, aby mohlo být použito jako kvantitativně přesný teploměr (Cuffey et al. 1995). Taková kalibrace byla použita pro dlouholeté záznamy z polárních ledových příkrovů, ale ne pro vysokohorská ledová jádra v nízkých nadmořských výškách (z And, Kilimandžára a Tibetu), kde je obtížnější izolovat a kvantifikovat teplotní složku signálu. Obecně lze říci, že záznamy izotopového poměru ledu z vnitřních oblastí polárních ledovců poskytují dobré teplotní rekonstrukce (Alley a Cuffey 2001, Cuffey et al. 1995). Izotopové poměry ledu v nízkých zeměpisných šířkách poskytují klimatický signál, který závisí na různých hydrologických a teplotních vlivech v široké geografické oblasti, která zásobuje vlhkostí vysoké zaledněné hory (Pierrehumbert 1999, Tian et al. 2003, Vuille et al. 2003a, Hoffmann et al. 2003, Thompson a Davis 2005, Alley a Cuffey 2001, Jouzel et al. 1997). Souvislost izotopového poměru ledu s teplotou je silnější při nižších teplotách (např. Kavanaugh a Cuffey 2003, Jouzel et al. 1997).

Všechny ledovcové lokality v nízkých zeměpisných šířkách jsou dostatečně chladné, aby se tento teplotní vliv projevil v poměru izotopů ledu (Pierrehumbert 1999, Tian et al. 2003). Nejednoznačnost vyplývá z významných zbytkových vlivů teplejších oblastí proti větru a lokálních procesů souvisejících s načasováním a zachováním sněhových srážek (Hardy et al. 2003). Největší význam má vliv množství srážek (Dansgaard 1964). V blízkosti hladiny moře v nízkých zeměpisných šířkách izotopové poměry ve srážkách prokazatelně neodrážejí změny teploty při zemi - proces destilace vody probíhá především ve vertikálním rozměru ve velkých bouřkových mracích, což vede ke korelaci mezi množstvím srážek a izotopy při zemi, nikoli ke korelaci mezi teplotou a izotopy. Jádra ledovců ve vysokých nadmořských výškách s nízkou nadmořskou výškou se nacházejí v přechodné zóně, kde má vliv jak teplota, tak tento srážkový efekt (Pierrehumbert 1999).

V Tibetu se zdá, že izotopové poměry ledu na jihu jsou dominantně ovlivněny monzunovými srážkami, zatímco na severu převládá teplota (Yao et al. 1996, Tian et al. 2003). V rovníkových Andách si izotopové poměry ledu zachovávají silný vliv srážek nad Amazonskou nížinou a částečně korelují jak s teplotami povrchu Tichého oceánu, tak s teplotami Amazonie (Henderson et al. 1999,

Hardy et al. 2003, Vuille et al. 2003a). Lokální oteplení pozorované na ledovci Quelccaya (Thompson et al. 2000a, Mark a Seltzer 2005) skutečně koreluje s tamním izotopovým poměrem ledu. V Tibetu i v Andách není jasný vztah mezi izotopovým poměrem ledu a lokální akumulací na ledových čepičkách. Izotopové poměry ledu v těchto lokalitách tedy nejsou silně ovlivněny místními srážkami, ale hydrologické vlivy zadržované z nížinných oblastí proti větru mohou být stále velmi důležité. Vlivy na izotopový poměr ledu v rovníkové Africe nejsou známy.

KALIBRACE A ROZLIŠENÍ

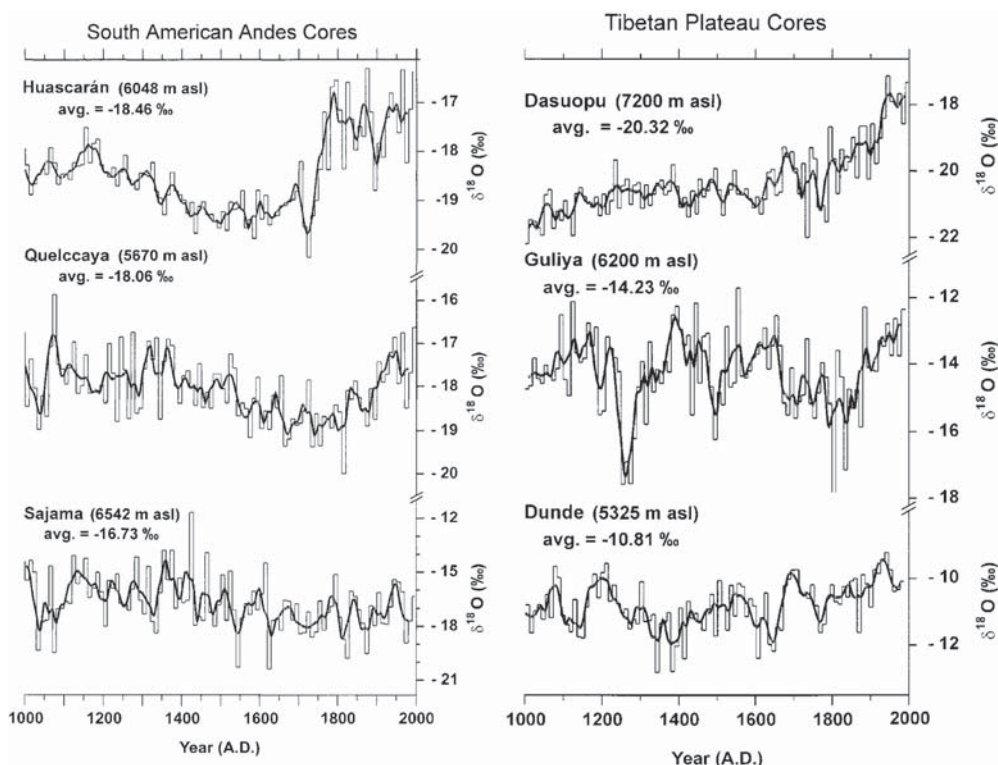
Korelace izotopového poměru ledu s teplotou je velmi silná v chladných vnitřních částech polárních ledovců. Kalibrace je nicméně nutná, protože faktory, jako je sezónní načasování srážek, příklon bouří k teplému počasí a atmosférické míchání vzduchových hmot, se mohou s časem měnit. Kalibrace teploměru izotopového poměru ledu se provádí v různých časových měřících (Alley a Cuffey 2001 a odkazy v nich) pomocí záznamů meteorologických stanic a družic pro roční cykly, pomocí izotopových poměrů plynů pro rychlé změny klimatu v desetiletém měřítku a pomocí teplot z vrtů pro změny klimatu v měřítku od jednoho století do jednoho tisíciletí. Tyto studie ukázaly, že izotopové poměry polárního ledu jsou spolehlivými teploměry. Před kalibrací jsou teplotní změny odvozené ze změn izotopového poměru ledu přesné s přesností na násobek přibližně 2. Teploty zaznamenané pomocí izotopového poměru ledu v polárních ledových příkrovech jsou reprezentativní pro širokou oblast v nitru ledového příkrovu a zahrnují také otisk teploty v mnohem větším měřítku.

Časové rozlišení rekonstrukcí teplotního poměru izotopů ledu se liší podle místa. Mnoho lokalit z Grónska, kanadské Arktidy a tropů má téměř roční rozlišení, zatímco lokality z velmi suchého vnitrozemí východní Antarktidy mají pouze dekádové rozlišení. Difuzní vyhlazování na většině míst snižuje rozlišení z ročního na několik let nebo více a toto snížení rozlišení se zvyšuje směrem zpět v čase. Časové rozpětí, které pokrývají záznamy o poměru izotopů v ledu, je největší tam, kde jsou sněhové srážky malé a tloušťky ledovců největší, a pohybuje se od několika set tisíc let v centrální části východní Antarktidy přes 100 000 let v centrálním Grónsku až po 10 000 let ve vysokohorských tropech a pobřežní Antarktidě a Grónsku. Většina ledovců v horách středních poloh nemůže poskytnout takto dlouhé záznamy, protože ledová masa je příliš rychle odstraňována prouděním.

VÝSLEDKY ZE ZÁZNAMŮ IZOTOPOVÉHO POMĚRU LEDU

Čtyři dostupná ledová jádra z Tibetu (obr. 6-1 a 6-2) společně ukazují, že klima 20. století je v této oblasti anomální ve srovnání s předchozími 1900 lety (Thompson et al. 1989, 1997, 2000a, 2003, 2006, v tisku).² Anomálie je určitou kombinací zjevně teplých podmínek a slabých monzunových srážek. To, že součástí tohoto signálu je oteplení, je zřejmé vzhledem k tomu, že anomálie je patrná v severních tibetských záznamech a že jižní záznamy s převahou monzunů korelují s instrumentálními trendy v regionu (Thompson et al. 2000a; jádro Dasuopu). A

²Důkazy pocházejí z jader Dundee, Guliya, Dasuopu a Puruogangri.

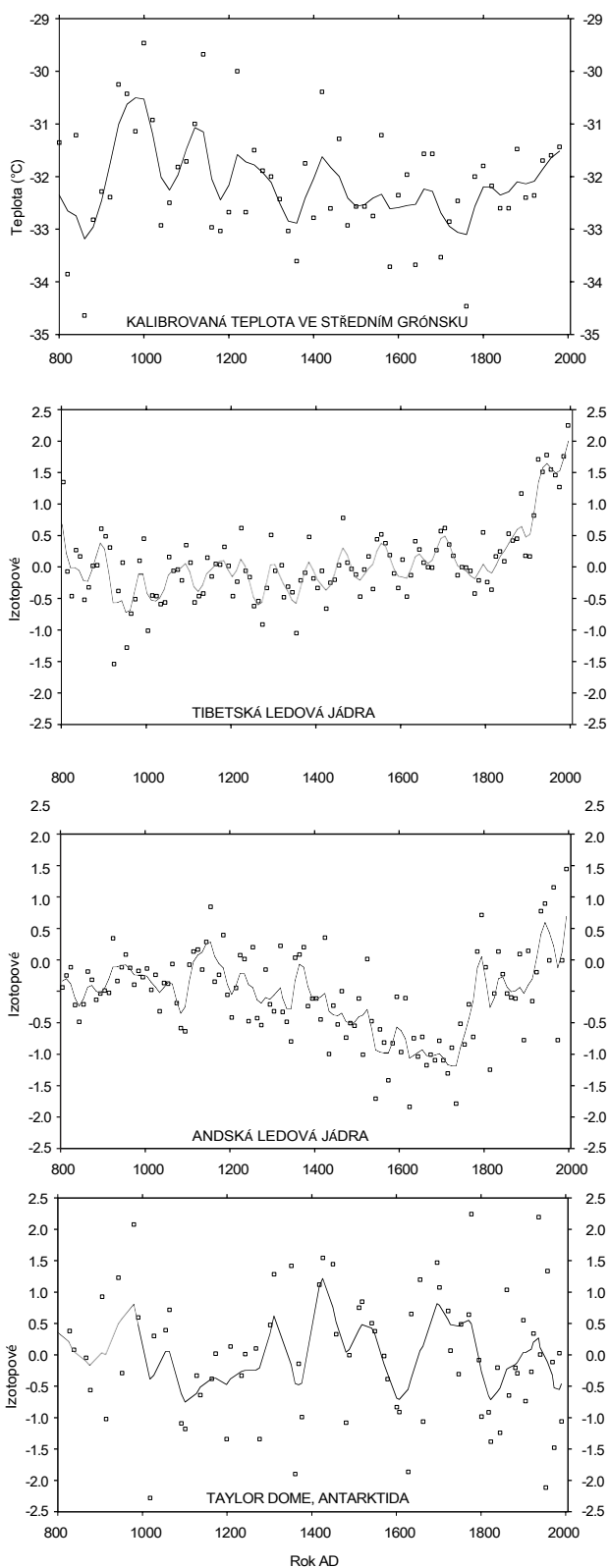


OBRÁZEK 6-1 Izotopové záznamy z vysokohorských ledových jader z rovníkových And (vlevo) a Tibetské náhorní plošiny (vpravo). Vyšší izotopové hodnoty obecně ukazují na teplejší podmínky, ale v záznamech z And mohou dominovat hydrologické faktory, jako jsou srážky v Ama- zii. ZDROJ: Thompson et al. (2003). Přetištěno s laskavým svolením Springer Science and Business Media; copyright 2003.

kvantitativní hodnocení teplotních změn ze severotibetských jader s využitím typické izotopové citlivosti je předběžné, ale obě naznačují oteplení za posledních 150 let nejméně o 1 °C.³

Záznamy izotopového poměru ledu dostupné ze tří lokalit ve vysokých Andách (obr. 6-1 a 6-2) společně naznačují teplé podmínky a slabé amazonské srážky v posledních dvou stoletích, relativně chladné a vlhké v letech 1400 až 1800 a relativně teplé a suché předtím (Thompson et al. 1986, 1995, 1998, 2000b, 2003, 2006). Současné teplé/suché období je v Quelccaya jevem 20. století, ale v Huascaranu (na severu) zjevně začalo kolem roku 1750 a v Sajamě (na jihu) chybí. Tento gradient v zeměpisné šířce je zajímavý, ale zatím není pochopen. Izotopové složení ledu

³To odpovídá i trendům v instrumentálních záznamech na Tibetské náhorní plošině (Liu a Chen 2000).



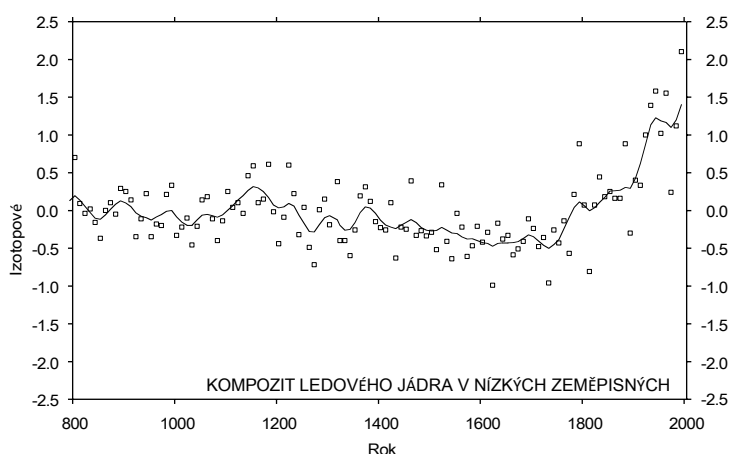
OBRÁZEK 6-2 Dva složené izotopové záznamy z nízkých zeměpisných šířek a dva izotopové záznamy z jednotlivých míst polárních ledovců. Nahoře: Záznam z centrální části Grónska (lokality GISP2), přepočtený na teplotu kalibrací vůči teplotám z vrtů. Druhý shora: Složený záznam (normalizovaný na průměr a směrodatnou odchylku) pro čtyři ledová jádra.

z Tibetu. Třetí shora: Složený záznam (normalizovaný na průměr a směrodatnou odchylku) pro tři ledová jádra z rovníkových And. Dole: Normalizovaný záznam (deuterium) z Taylorova dómu v Antarktidě. V každém grafu jsou data zobrazena jako bodová měření a a

Vyhlazená verze je pro přehlednost nadřazená.

trendy. Centrální řady Greenland a Taylor Dome jsou vyhlazeny pomocí 100letého trojúhelníkového filtru, zatímco složená řada používá 50letý trojúhelníkový filtr. ZDROJE: Údaje z

Cuffey a Clow (1997), Thompson et al. (2003, 2006) a Steig et al. (2000).



OBRÁZEK 6-3 Kompozitní izotopové záznamy z nízkých zeměpisných šířek, včetně čtyř ledových jader z Tibetu a tří z And. Izotopové záznamy byly normalizovány na průměr a směrodatnou odchylku a zprůměrovány. Plná čára je vyhlazená verze složeného záznamu vytvořená pomocí 50letého trojúhelníkového filtru. ZDROJ: Údaje z Thompson et al. (2006). Přetištěno se svolením; copyright 2006.

poměry z Kilimandžára neodhalují žádný konzistentní trend za poslední dvě tisíciletí (Thompson et al. 2002).

Kombinovaný izotopový signál ze všech dostupných ledových jader v Tibetu a Andách ukazuje, že klima 20. století bylo v porovnání s předchozími 1900 lety neobvyklé (obr. 6-3).

V Grónsku (obr. 6-2) a v pobřežní Antarktidě záznamy o poměru izotopů v ledu jasně ukazují oteplení ve 20. století, malou dobu ledovou a dřívější oteplení. V Grónsku je toto dřívější oteplení soustředěno přibližně do roku 1000 n. l., zatímco v Antarktidě bylo mnohem dřívější. Analýzy teplot z vrtů poskytují stejný vzorec (viz kapitola 8). V Grónsku není oteplení ve 20. století vyšší než ve středověku (11. století). V kanadské Arktidě ukazují záznamy o poměru izotopů v ledu z ledovce Agassiz na Ellesmerově ostrově oteplení za posledních 150 let, které je pro poslední tisíciletí nevídané (Fisher et al. 1995). Jako skupina nevykazují ledová jádra z vnitřních oblastí Antarktidy (obr. 6-2) nic anomálního ohledně 20. století (Masson et al. 2000).

7

Záznamy o délce a hmotnostní bilanci ledovce

- Záznamy o délce ledovce lze použít k odvození teplotní historie. Tyto záznamy ukazují globální oteplení přibližně o 0,6 °C v letech 1850-1990 a chladnější podmínky v předchozích několika stoletích.
- Většina ledovců ve vysokých pohořích mimo polární oblasti ustoupila během posledních 150 let především v důsledku oteplování. Další důkazy z ledovců naznačují, že nedávné oteplení nemá v tisíciletých časových horizontech obdoby, včetně tání a ústupu ledovců v Andách a rozpadu antarktických ledovcových šelfů.
- Délka ledovce je také ovlivněna změnami srážek, ale sněhové srážky na horských ledovcích se v současnosti v průměru zvyšují, takže ústup ledovců není způsoben klimatickým vysycháním.
- Délka ledovce poskytuje informace o teplotě, které jsou nezávislé na jiných metodách rekonstrukce teploty, včetně přístrojových záznamů.
- Záznamy o délce ledovců je třeba aktualizovat, aby se rozšířily teplotní rekonstrukce od roku 1990 do současnosti.

Mimo velmi chladné polární oblasti většina ledovců v pohořích po celém světě během 20. století výrazně ustoupila (Oerlemans 1994, 2005a; Dyurgerov a Meier 1997a,b, 2000; Sapiano et al. 1998; Kaser 1999; Warren a Aniya 1999; Francou et al. 2000; Arendt et al. 2002; Dyurgerov 2003; Khromova et al. 2003; Thompson et al. in press). Snížení ledové pokrývky je výrazné téměř ve všech zkoumaných velkých zaledněných pohořích, včetně Aljašského pohoří a Aljašského jihovýchodního pohoří, kanadských Skalistých hor, Washingtonských Kaskád, rovníkových a patagonských And, evropských Alp, Novozélandských Alp, Tien-Šanu a Himálaje. Ve středních a vysokých zeměpisných šířkách byl tento ústup ledovců způsoben především

rozsáhlé klimatické oteplování, které zvýšilo úbytek ledu táním (Oerlemans 2001, 2005a; Dyurgerov a Meier 2000; Oerlemans a kol. 1998; Zuo a Oerlemans 1997; Oerlemans a Fortuin 1992). V tropech byl ústup ledovců zřejmě způsoben jak změnami teploty, tak změnami vlhkosti, v závislosti na čase a regionu (Kaser 1999, Francou et al. 2000, Mölg et al. 2003, Vuille et al. 2003b, Kaser et al. 2004, Mark a Seltzer 2005). V tropických Andách je dominantním faktorem oteplování (Thompson et al. 2000b, Vuille et al. 2003b, Mark a Seltzer 2005), zatímco v rovníkové Africe má vliv změna vlhkosti (Mölg et al. 2003, Kaser et al. 2004). V průměru se na těchto ledovcích v druhé polovině 20. století mírně zvýšily sněhové srážky (Dyurgerov a Meier 2000), což poskytuje silný důkaz proti vysychání jako příčině ústupu pro toto období.

REKONSTRUKCE TEPLOTNÍCH ZÁZNAMŮ ZE ZÁZNAMŮ LEDOVců

Záznamy o změnách délky ledovců během 20. století a dříve byly analyzovány za účelem rekonstrukce teplotních změn v minulosti (Oerlemans 1994, 2005a; Oerlemans et al. 1998). Tyto analýzy vycházejí z fyziky ledovců (Paterson 1994, Van der Veen 1999,

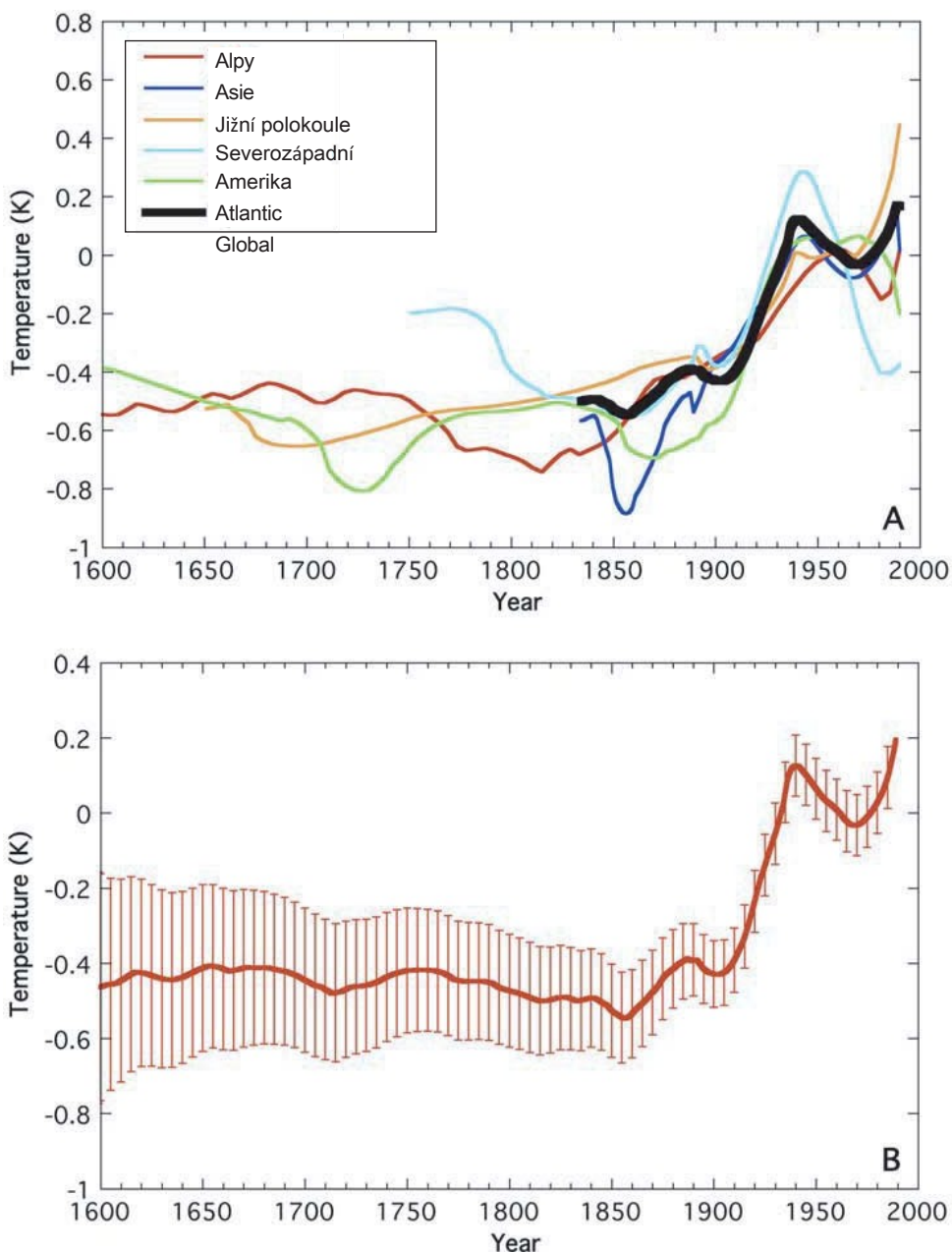
Oerlemans 2001) a poskytují informace o teplotě, které jsou nezávislé na jiných metodách rekonstrukce teploty. Zejména rekonstrukce teploty z ústupu ledovců není kalibrována podle instrumentálního záznamu. Místo toho je založena na modelech dynamiky ledovců, které jsou velmi zobecněné, ale kalibrované na základě malého počtu rozsáhlé studovaných ledovcových systémů (Oerlemans et al. 1998, Oerlemans 2001), pro které bylo dokončeno realistické modelování dynamiky ledovců a energetické bilance. Rekonstrukce teploty na základě délky ledovce jsou dále významné, protože vlivy městských tepelných ostrovů a změn ve využívání půdy jsou pravděpodobně malé. Oerlemans (2005a) ukázal, že teploty od konce 19. do poloviny 20. století vzrostly přibližně o 0,6 °C a v předchozích třech stoletích byly trvale chladné (obr. 7-1). Výsledky také ukazují malé ochlazení v letech 1950-1980, po němž následovalo opětovné oteplení až do konce záznamu v roce 1990. Údaje o nedávných a probíhajících ústupech nebyly dosud rozsáhle zpracovány. Je však známo, že úbytek hmoty z horských ledovců se v 90. letech 20. století silně zvýšil především v důsledku zrychleného ústupu ledovců.

oteplování (Dyurgerov 2003, Meier et al. 2003, Dyurgerov a Meier 2005).

V období překrývání (1850-1990) jsou rekonstrukce délky ledovce a instrumentální záznamy velmi podobné co do velikosti a struktury (Oerlemans 2005a). Záznam délky ledovce tak potvrzuje kvantitativní přesnost instrumentálního kompozitu pro toto období jako velkoplošného průměru. Rekonstruované teploty ze záznamu délky ledovce jsou podobné pro ledovce v nízkých a vysokých nadmořských výškách (Oerlemans 2005a). Převládající vzorec chladného klimatu po několik století následovaný oteplením začínaje koncem 19. století je patrný ve všech zkoumaných geografických oblastech, i když v detailech existují značné rozdíly.

PODROBNĚJŠÍ INFORMACE O REKONSTRUKCÍCH ZALOŽENÝCH NA DÉLCE LEDOVCE.

Nejnovější a nejkompexnější rekonstrukce teploty (Oerlemans 2005a) využívá záznamy o délce ledovců pro velký počet ledovců (Oerlemans et al. 1998, Oerlemans 2001). Informace potřebné pro podrobné individuální modelování pro většinu těchto ledovců neexistují, takže analýza namísto toho používá přibližný a



OBRÁZEK 7-1 (A) Rekonstrukce teploty na základě délky ledovce pro různé oblasti. Černá křivka znázorňuje odhadovanou globální průměrnou hodnotu získanou přidělením vah 0,5 jižní polokouli, 0,1 severozápadní Americe, 0,15 atlantickému sektoru, 0,1 Alpám a 0,15 Asii. (B) Nejlepší odhad globální průměrné teploty, získaný kombinací vážené globální průměrné teploty pro období 1834-1990 s průměrem teplotních záznamů z dřívějších období. Pásmo označuje odhadovanou směrodatnou odchylku. ZDROJ: Oerlemans (2005a). Přetištěno se svolením AAAS; copyright 2005.

zobecněný přístup. Jak citlivost délky ledovce na teplotu, tak doba zpoždění reakce ledovce jsou parametrizovány z hlediska dominantních fyzikálních faktorů nebo korelátů, kterými jsou topografický sklon, roční úhrn srážek a samotná délka ledovce. Souvislost těchto parametrizací s fyzikálními podklady je doložena v odborné literatuře, včetně podrobných analýz konkrétních ledovců (Oerlemans et al. 1998, Oerlemans 2001). Očekává se však, že tyto parametrizace budou přesné pouze jako průměr pro velký počet ledovců.

Citlivost délky ledovce na teplotu vyplývá ze základního aspektu ledovcových systémů (Paterson 1994, Van der Veen 1999, Oerlemans 2001)¹: Ledovec tvořící se ve vysoké nadmořské výšce bude postupovat směrem dolů a prodlužovat své čelo do oblasti čistého tání, dokud veškerý tok ledové hmoty dodávaný z oblastí s vysokou nadmořskou výškou nebude odstraněn táním v nižší oblasti. Ledovce budou vždy směřovat k takové rovnováze mezi přítokem hmoty do systému a odtokem hmoty a této rovnováhy bude dosaženo, když se ledovec bude pohybovat na hranici mezi oblastmi čistého tání a čistého sněžení. Jakákoli změna klimatu ovlivní tuto křehkou rovnováhu a způsobí určitou úpravu ledovcového systému.

Dominantními klimatickými vlivy jsou teplota a množství sněhových srážek, i když v některých situacích mohou být důležité i další proměnné, například oblačnost. Zvýšení teploty v nadloží atmosféry zvyšuje přívod energie na povrch tajícího ledovce prostřednictvím zvýšeného dlouhovělného záření směrem dolů a zvýšeného přenosu citelného tepla, což zvyšuje rychlost tání. Zvýšení teploty také způsobuje, že se více srážek dostává na povrch ledovce ve formě deště namísto sněžení. Sněhové srážky představují přísun nové ledové hmoty, která udržuje ledovec. Snížení nebo zvýšení rychlosti sněžení způsobí zmenšení, respektive zvětšení ledovce.

Pokud jde o jednotlivé ledovce, změny sněhových srážek mohou způsobit jejich postup a ústup a tento efekt v některých situacích převládá (např. v západním Norsku před koncem 90. let 20. století). Teplota je však v průměru silnějším vlivem, protože proces tání působí pouze v malé části ročního cyklu a spotřebovává malou část celkového toku energie, takže její schopnost změny je velká. Typický kvantitativní odhad pákového efektu teploty versus sněhové srážky na horské ledovce je, že zvýšení teploty o 1 °C odpovídá 25procentnímu snížení sněhových srážek (Oerlemans a Fortuin 1992, Oerlemans et al. 1998, Oerlemans 2001). V důsledku toho se ledovce na Zemi vyskytují ve srážkových režimech sahajících od velmi vlhkých mírných a tropických vysočin až po nejsušší polární pouště, ale zcela chybí v prostředích zahrnujících velký rozsah středních až vysokých průměrných ročních teplot.

V zásadě by bylo možné, aby se celosvětová populace ledovců v uplynulém století zmenšila v důsledku globálního snížení srážek. Neexistují však žádné důkazy o takovém globálním vysychání (Folland et al. 2001a), což by vyžadovalo nebývalou prostorovou soudržnost. Kromě toho cílené studie jednotlivých ledovců ukazují dominantní roli teplotních změn při ústupu ve 20. století (Oerlemans et al. 1998, Oerlemans 2001) a studie hmotnostní bilance pro pozdější 20. století ukazují, že v průměru u studovaných ledovců sněhové srážky rostou

¹Probíráme zde pouze ledovce, které končí na pevnině a nacházejí se v dostatečně teplém prostředí, aby ztrácely hmotu především táním, nikoliv tvorbou ledovců nebo sublimací.

(Dyurgerov a Meier 2000, Dyurgerov 2003). Proto je rozumné předpokládat, že změny srážek vyvolávají variabilitu (nebo šum) v záznamu délky ledovce, ale neovlivňují jeho globální průměrný průběh. Na druhou stranu regionální vzorce jsou v některých případech ovládnány srážkami nebo jinými proměnnými. Například na konci 20. století zvýšené sněhové srážky způsobily postup ledovců v západní Skandinávii (Dyurgerov a Meier 1997a,b, 2000), zatímco kombinace srážek a teplotních změn vyvolala ústup ledovců v rovníkové Africe (Mölg et al. 2003, Kaser et al. 2004, Hastenrath 2005). Ačkoli oteplování v posledních desetiletích je důležitým faktorem, který způsobuje ústup ledovců na hoře Keňa a na vrcholcích Ruwenzori, mnohem výše položené ledovce na Kilimandžáru se mohou zmenšovat především jako pokračující reakce na změny srážek z počátku století. Rozsah a význam nedávného oteplení se stále zkoumá.

Rekonstrukce teploty na základě záznamů o délce ledovce a hmotnostní bilanci mají omezené časové a prostorové rozlišení. Neposkytují meziroční pohled na změny teploty, ale pouze průměry za několik let až desetiletí (v závislosti na rozlišení měření délky a na přesnosti předpokladů ve fyzice). Neposkytují žádné informace o většině zeměkoule před 19. stoletím. Pouze severoatlantické a evropské alpské oblasti mají záznamy o ledovcích z období kolem roku 1600 n. l., a i v těchto oblastech je málo informací před 17. stoletím. Doba potřebná pro sběr, kompilaci a hlášení údajů zatím brání tomu, aby bylo do analýzy zahrnuto posledních 15 let. V Severní Americe končí mnoho záznamů o ledovcích mezi polovinou 70. let 20. století a rokem 1990 (Oerlemans 2005a), takže pro tuto oblast není rekonstrukce z konce 20. století zatím spolehlivá. Geografické limity vyplývají ze zřejmé skutečnosti, že ledovce neexistují všude, takže nízké a střední polohy v nízkých zeměpisných šířkách zcela chybí. Rovněž pro jižní polokouli je nedostatek údajů. A konečně, tyto rekonstrukce nelze provést pro horské ledovce v Antarktidě, protože je tam tak chladno, že tání není dominantním procesem úbytku hmoty (tím je produkce ledovců), takže souvislost s teplotou je jiná.

DALŠÍ DOSTUPNÉ INFORMACE Z LEDOVců

Ačkoli nejsou vhodné pro rekonstrukci časových řad teplot, jiné ledovcové ukazatele - jako je tání ledovců, organický materiál odhalený při tání ledovců a rozpad ledovcových šelfů - poskytují informace o teplotě. Nárůst letního tepla za posledních 150 let způsobil zvýšené tání hlavní ledovcové čepičky na Ellesmerově ostrově v kanadské Arktidě. K takovému rozsahu tání nedošlo v předchozích 1 500 letech (Fisher et al. 1995).

Nedávný ústup ledovců odhalil organický materiál, který by se de- skládal, kdyby nebyl pokryt ledem, včetně lidského těla (dnes známý "ledový muž" z Alp) a rostlinného materiálu (Thompson et al. v tisku). Tři z těchto nálezů byly datovány (z Alp, ze státu Washington a z Peru) a všechny mají stáří vyšší než 5 000 let před současností. To poměrně silně naznačuje, že současná deglaciace nemá na těchto rozsáhlých lokalitách v posledních několika tisíciletích obdoby. Nicméně z datování organického materiálu transportovaného na čela ledovců v Alpách je známo, že na některých lokalitách v Evropě došlo k ledovcovým recesím rozsáhlejšími, než je ta současná (Hormes et al. 2001), s datací od roku 800 do roku 2000 po Kr.

8000 př. n. l. K takovému poklesu tedy v minulosti docházelo v důsledku přirozené proměnlivosti, ale v posledních několika tisících letech byl vzácný.

V Andách, na stejném ledovci, kde byl datovaný rostlinný materiál odhalen (Quelccaya), bylo tání v 80. letech 20. století natolik silné, že zničilo geochemickou signaturu ročních vrstev v ledu pod ním (Alley 2006; Thompson et al. 2003, v tisku). Ledové jádro odebrané z Quelccaya koncem 70. let 20. století ukázalo, že k takovému tání nedošlo přinejmenším v předchozím tisíciletí. To silně naznačuje anomální oteplení na konci 20. století. Ledovec Quelccaya existuje bez přerušení již více než 1000 let. Pokud bude její současné tempo zmenšování pokračovat, během několika desetiletí zcela zmizí.

V posledních několika desetiletích se plovoucí ledové šelfy podél Antarktického poloostrova postupně rozpadají směrem na jih (Vaughan a Doake 1996, Cook et al. 2005). Je to především důsledek vyšších teplot vyvolávajících tání na povrchu (van den Broeke 2005). Analýza jader sedimentů z mořského dna (Domack et al. 2005) pod jedním z největších bývalých šelfů (Larsen B, který se rozpadl koncem 90. let 20. století) ukazuje, že tento šelfový ledovec přetrvával po celých předchozích 10 000 let, což poskytuje další důkaz, že poslední desetiletí byla anomálně teplá.

8

Vrty

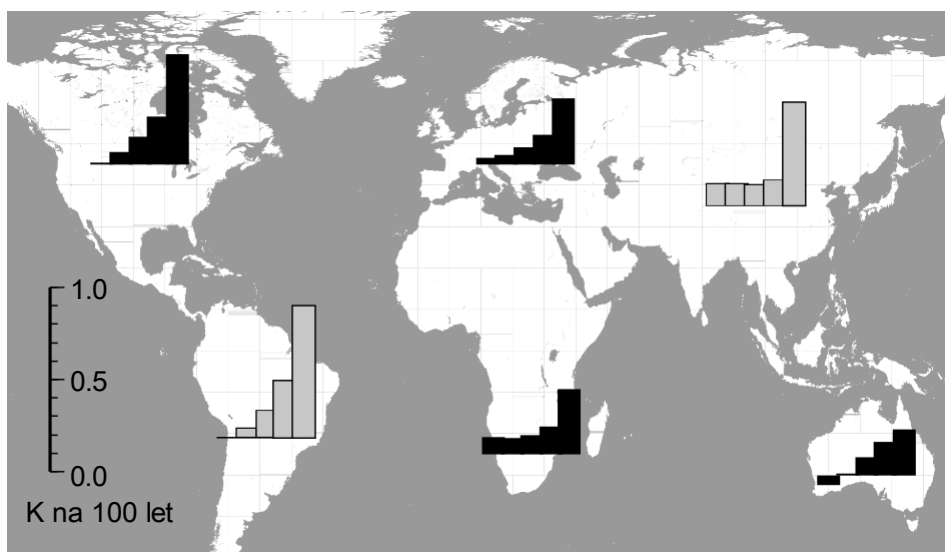
- Měření teploty pod zemským povrchem ukazují na rozsáhlé oteplení v posledním století a chladnější podmínky v předchozích čtyřech stoletích.
- Odhaduje se, že oteplení od roku 1850 do roku 1990 dosáhlo přibližně $0,7\text{ °C} \pm 0,2\text{ °C}$, což odpovídá přístrojovým záznamům.
- Teploty odvozené z údajů z vrtů nejsou kalibrovány na základě přístrojových záznamů teplot, což poskytuje nezávislé měření teploty v minulosti.
- Pro období 1600-1900 mají rekonstrukce teplot na základě vrtů rozlišení ve stoletém měřítku, a proto poskytují informace o dlouhodobých teplotních trendech, ale ne o desetiletých nebo ročních změnách.

Když se změní teplota na povrchu půdy, změní se v reakci na to i teplota podloží (půdy, skály nebo ledu), protože teplo se šíří a postupuje vertikálně. Například trvalé zvýšení teploty na povrchu země způsobí vlnu oteplení, která se šíří směrem dolů. Vertikální rozložení teploty pod povrchem tak obsahuje informace o minulých teplotách na povrchu (Lachenbruch a Marshall 1986, Paterson 1994). Hlubkové teplotní profily tohoto druhu se měří ve vrtech a analýzy těchto dat lze použít k vytvoření rekonstrukce teploty vzduchu při povrchu (Lachenbruch a Marshall 1986, Huang et al. 2000, Pollack a Huang 2000, Harris a Chapman 2001, Pollack a Smerdon 2004, Majorowicz et al. 2006) za předpokladu, že teplota při povrchu země a klimatická teplota v místě vrtu spolu úzce souvisejí.

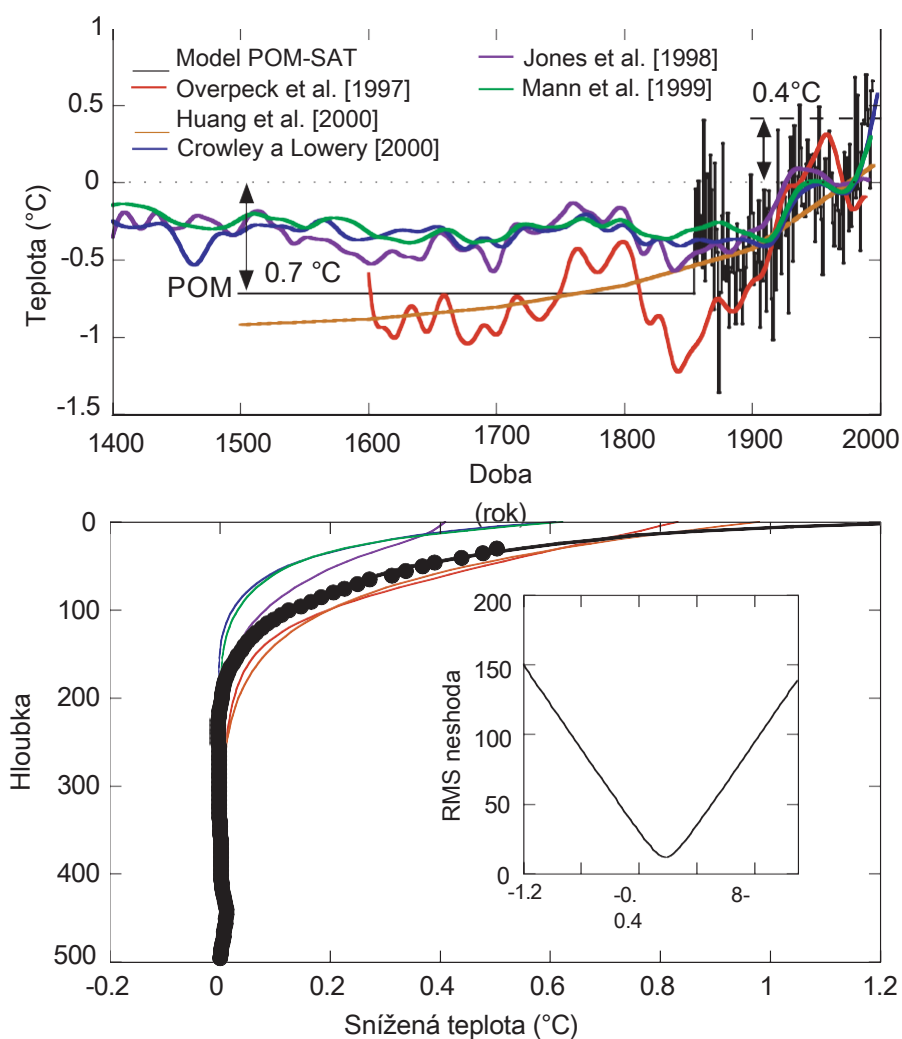
VRTY VE SKALÁCH A VĚČNĚ ZMRZLÉ PŮDĚ.

Analýzy velkého počtu kontinentálních vrtů přinesly rekonstrukce teplot za posledních 500 let (Lachenbruch a Marshall 1986, Pollack a Huang 2000, Harris a Chapman 2001, Majorowicz et al. 2006). Tyto rekonstrukce mají zvláštní hodnotu, protože se nemusí kalibrovat podle instrumentálního záznamu a protože se měří samotná teplota, nikoliv její zástupný ukazatel. Existují významné kvantitativní nejistoty, ale obecné trendy v těchto rekonstrukcích jsou pravděpodobně robustní.

Rekonstrukce teplot na základě vrtů zprůměrovaných pro široké oblasti (včetně východní části Severní Ameriky, západní části Severní Ameriky, Evropy, Austrálie a jižní Afriky) ukazují oteplování od 19. století do současnosti a trvale chladné podmínky v předchozích několika stoletích (Gosnold et al. 1997, Pollack a Huang 2000 a odkazy v nich, Huang et al. 2000, Harris a Chapman 2001, Pollack a Smerdon 2004, Majorowicz et al. 2006). Změny teplot v dřívějších obdobích nejsou jednoznačné. Odhady velikosti nedávného oteplení jako globálního (kontinentálního) průměru nebo průměru ve středních zeměpisných šířkách jsou přibližně 0,7-0,9 °K od poloviny 19. století do konce 20. století (Huang et al. 2000, Pollack a Huang 2000, Harris a Chapman 2001), což je podobné nárůstu teploty odhadovanému z přístrojových záznamů, o němž pojednává kapitola 2 (obr. 8-1 a 8-2). Některé



OBRÁZEK 8-1 Shrnutí rekonstrukcí kontinentálních stoletých trendů teploty zemského povrchu na základě vrtů. V každém sloupcovém grafu představuje pět sloupců zleva doprava velikost nárůstu teploty v 16., 17., 18., 19. a 20. století. Velikost změny teploty je znázorněna jako výška sloupce. Rekonstrukce pro Jižní Ameriku a Asii jsou lehce stínované, aby se naznačila větší nejistota na těchto dvou kontinentech z důvodu malé prostorové hustoty pozorování. ZDROJ: Huang et al. (2000). Přetištěno se svolením Macmillan Publishers Ltd.; copyright 2000.



OBRÁZEK 8-2 Zde bylo použito šest klimatických rekonstrukcí k předpovědi podpovrchové teploty. Pro každou křivku na horním panelu je rekonstrukce teploty použita jako povrchová teplota pro teplotní model k předpovědi teploty v hloubce. Na horním panelu je znázorněno šest rekonstrukcí, přičemž nula je definována jako průměr z let 1961-1990. Rekonstrukce zobrazená černě (označená POM-SAT) využívá teploty z vrtů k omezení předobservačního průměru (POM) a používá instrumentální teplotní záznamy od roku 1856. Naměřený průběh podpovrchových teplot (spodní panel, černé kroužky) je téměř dokonale vysvětlen přístrojovým záznamem a předchozími chladnými stoletími (černá křivka v horním panelu). ZDROJ: Harris a Chapman (2001). Reprodukováno se svolením Americké geofyzikální unie; copyright 2001.

Rekonstrukce založené na vrtech rovněž ukazují na dřívější trvalé menší oteplení o zhruba 0,3 °C v letech 1500 až 1850 (Pollack a Huang 2000, Huang et al. 2000) (obr. 8-1). Regionální odhady oteplení za posledních 150 let se pohybují od 2 až 4 °C pro severní Aljašku (Lachenbruch a Marshall 1986, Pollack a Huang 2000) po 0,5 °C pro Austrálii (Pollack a Huang 2000). Odhady pro západní a východní sektor Severní Ameriky se spíše liší, a to 0,4-0,6 °C a 1,0-1,3 °C (Pollack a Huang 2000).

OMEZENÍ REKONSTRUKCÍ NA ZÁKLADĚ VRTŮ

Časové rozlišení a délka rekonstrukcí povrchových teplot na základě vrtů jsou značně omezeny fyzikou procesu přenosu tepla (Clow 1992). Povrchový teplotní signál je při přenosu do hloubky nenávratně rozmazán. Časové rozlišení rekonstrukce se tak zpětně v čase snižuje. U vrtů ve skalách a věčně zmrzlé půdě je toto rozlišení několik desetiletí na začátku 20. století a několik století v roce 1500. Teploty z vrtů tak odhalují pouze dlouhodobé teplotní průměry a trendy před obdobím instrumentálních záznamů; neříkají nám nic o dekádoových výkyvech nebo konkrétních letech, s výjimkou těch nejnovějších. U skalních a věčně zmrzlých vrtů je teplotní rozmazání natolik silné, že znemožňuje obnovení jasných teplotních signálů před rokem 1500. Prostorové rozložení teplotních záznamů z vrtů je také silně zatíženo Severní Amerikou, Evropou, jižní Afrikou, východní Asií a Austrálií (Pollack a Smerdon 2004), téměř žádné informace nejsou z Jižní Ameriky a severní nebo střední Afriky a v Asii je pokrytí sporadické. Použitelné vrty jsou navíc většinou dědictvím důlního průzkumu, takže prostorové pokrytí nebylo zvoleno tak, aby optimalizovalo rekonstrukci klimatu.

Důležité kvantitativní nejistoty při rekonstrukcích na základě vrtů mohou pramenit ze dvou různých zdrojů. Zprvé, teploty ve vrtech reagují na teplotu povrchu země, a nikoli na teplotu v nadloží (Gosnold et al. 1997, Smerdon et al. 2004, Pollack et al. 2005). Je možné, že se tyto dvě teploty budou v průběhu času lišit, například v důsledku změn sněhové pokrývky a půdní vlhkosti. Klíčovou otázkou tedy je, zda jsou dlouhodobé trendy teploty vzduchu a přízemní teploty podobné. I když existují jasné výjimky (Gosnold et al. 1997), většina důkazů naznačuje, že tato podobnost je obecně silná: Jako velkoplošný geografický průměr se naměřené přízemní teploty shodují s teplotami předpovídanými přímo ze změn teploty vzduchu (Harris a Chapman 2001) a trendy teploty vzduchu a přízemní teploty jsou na některých konkrétních místech podobné (Baker a Ruschy 1993, Majorowicz a Safanda 2005, Majorowicz et al. 2006).

Druhým významným potenciálním zdrojem chyb při rekonstrukci teploty na základě skalních vrtů je prosakování podzemní vody směrem dolů, které může snížit teplotu v hloubce a být nesprávně interpretováno jako oteplování povrchu v čase (Chisholm a Chapman 1992, Harris a Chapman 1995, Ferguson a Woodbury 2005, Majorowicz et al. 2006). To může do rekonstrukcí založených na kontinentálních vrtech vnášet "oteplovací" zkreslení, jehož velikostí se nikdo systematicky nezabýval. Nicméně podobnost mezi naměřenými teplotami půdy a teplotami půdy vypočtenými na základě teplot vzduchu (Harris a Chapman 2001) naznačuje, že průměrné zkreslení musí být ve středních zeměpisných šířkách malé. Obecně může být zkreslení podzemní vody problémem pouze ve vlhkém podnebí a v horninách, které snadno vedou podzemní vodu (včetně všech silně rozpukaných hornin a mnoha pískovců a pískovců).

bazalty). Zkreslení podzemní vody nemůže být zodpovědné za silné rekonstruované oteplení v permafrostových oblastech severní Aljašky (Lachenbruch a Marshall 1986) a v polosuchých amerických a kanadských nížinách (Gosnold et al. 1997), i když může být částečně zodpovědné za silnější rekonstruované oteplení ve východní versus západní části Severní Ameriky (Pollack a Huang 2000). Srovnání trendů oteplování ve 20. století na základě vrtů a instrumentálního oteplování v konkrétních regionech (Pollack a Smerdon 2004) neukazuje žádný konzistentní posun související se srážkami: oteplování na základě vrtů převyšuje instrumentální oteplování ve vlhkých oblastech Severní Ameriky, ale je menší než instrumentální oteplování ve vlhkých oblastech Evropy a jihovýchodní Asie. To je dalším důkazem toho, že zkreslení podzemní vody je při rekonstrukcích teploty na základě vrtů ve větších měřících kvantitativně malé. Databáze teplot z vrtů byla prověřena, aby se vyloučily jiné druhy vlivů podzemní vody, které jsou snadněji patrné (Huang a Pollack 1998).

Odděleným problémem od nejistoty rekonstrukcí je skutečnost, že samotná teplota vzduchu se může měnit z mnoha místních důvodů, včetně odlesňování a rozšiřování měst (Skinner a Majorowicz 1999, Majorowicz et al. 2006), jak je uvedeno v kapitole 2. Teplota ve vrtech takové změny zaznamenává, což jsou skutečné změny místního klimatu. Databáze teplot z vrtů byla prověřena s cílem vyloučit lokality s vlivem měst. Vlivy změn ve využívání půdy ve venkovských oblastech nejsou eliminovány a představují část lidského vlivu na klima ve venkovských oblastech.

VRTY V LEDOVCOVÉM LEDU

Malý počet vrtů v ledových příkrovech byl také analyzován v souvislosti se studiem ledových jader (Cuffey et al. 1994, 1995; Cuffey a Clow 1997; Dahl- Jensen et al. 1998, 1999). Vrtý v ledovém příkrovu umožňují rekonstrukce teplot v delším časovém měřítku díky čistotě ledu, velké hloubce vrtů a možnosti kombinace s izotopovými informacemi ze samotného ledového jádra. Tyto analýzy lze provádět pouze v suchém studeném ledu, a proto jsou omezeny na polární ledové příkrovy a některé vysokohorské lokality. Stejně jako u kontinentálních vrtů je časové rozlišení rekonstrukcí silně omezeno procesem tepelného toku; ledové vrtý lze použít pouze k rekonstrukci dlouhodobých průměrných teplot. Při rekonstrukcích z ledových vrtů bylo použito několik různých metod, které přinesly podobné výsledky (Cuffey et al. 1995, Dahl- Jensen et al. 1998, Clow a Waddington 1999). Hlavním předpokladem těchto analýz je, že fyzikální proces přenosu tepla v ledu je dobře pochopen.

Stejně jako u kontinentálních vrtů poskytují ledové vrtý teplotní historii, která odpovídá místní povrchové teplotě. Pro centrální Grónsko (Cuffey et al. 1995, Cuffey a Clow 1997, Dahl-Jensen et al. 1998) výsledky ukazují oteplení za posledních 150 let o přibližně $1\text{ °C} \pm 0,2\text{ °C}$, kterému předcházelo několik století chladných podmínek. Tomu předcházelo teplé období s těžištěm kolem roku 1000 n. l., které bylo teplejší než konec 20. století přibližně o 1 °C . Analýza pro jižní a střední Grónsko (Dahl-Jensen et al. 1998) ukazuje stejný vzorec oteplování a ochlazování, ale s většími změnami. Nejistota těchto dřívějších čísel činí několik desetin stupně Celsia pro průměry za několik století.

Vrt z Law Dome (Dahl-Jensen et al. 1999) v pobřežní východní Antarktidě ukazuje oteplení o přibližně $0,7\text{ °C}$ od poloviny 19. století do současnosti (nejistota přibližně $0,2\text{ °C}$). Tomu předcházelo období srovnatelné

Teplé období s těžištěm v letech 1500-1600, o 1 °C chladnější období s těžištěm v roce 1300 a trvale teplejší podmínky před tímto obdobím (teplota v roce 1 n. l. byla přibližně o 1 °C vyšší než na konci 20. století). Během středověku nebylo na této lokalitě zaznamenáno žádné zjevné oteplení. Nejistoty těchto výsledků pro dřívější období se pohybují v řádu několika desetin stupně Celsia pro průměry za několik století.

9

Statistické podklady

- Standardní proxy rekonstrukce založené na lineární regresi jsou obecně rozumné statistické metody pro odhad teplot v minulosti, ale mohou být spojeny se značnou nejistotou.
- Je třeba důsledněji charakterizovat statistickou chybu proxy rekonstrukcí teploty, která by zahrnovala zohlednění časové korelace a výběr hlavních komponent.
- Variabilita rekonstruovaných proxy teplot bude menší než variabilita skutečných teplot a nemusí reprodukovat skutečný průběh teplot v určitých časových intervalech.
- Zkoumání předpovědi rekonstrukce v ověřovacím období je důležité, ale délka tohoto období stanoví limity pro statistické hodnocení nejistoty rekonstrukce. Nejkritičtější je, že relativně krátký instrumentální teplotní záznam poskytuje velmi málo stupňů volnosti¹ pro ověření nízkofrekvenčního obsahu rekonstrukce.
- Rozdíly mezi souborem proxy rekonstrukcí, které nebyly záměrně vytvořeny jako reprezentativní statistický vzorek, nemusí odhalit plnou nejistotu žádné z nich.

Proces rekonstrukce klimatických záznamů z většiny proxy dat je v podstatě statistický a všechny snahy o odhad regionální nebo globální historie klimatu z více údajů jsou v podstatě statistické.

¹ "Stupně volnosti" měří množství informací pro odhad rozptylu; konkrétně se jedná o ekvivalentní počet nezávislých pozorování.

zástupných údajů vyžadují statistické analýzy. Prvním krokem je obvykle rozdělení období přístrojových měření na dva úseky: kalibrační období a validační období. Statistický vztah mezi proxy daty (např. šířkou letokruhů stromů nebo multiproxy souborem) a instrumentálními měřeními klimatické proměnné (např. povrchové teploty) se určuje v kalibračním období. Pomocí tohoto statistického vztahu se pak rekonstruují minulé změny klimatické proměnné, včetně změn v průběhu validačního období, aby se proměnná předpověděla z proxy dat. Předtím, než je proxy rekonstrukce přijata jako platná, je prověřen vztah mezi rekonstrukcí a instrumentálními měřeními během validačního období, aby se otestovala přesnost rekonstrukce. V úplné statistické analýze by měl krok validace zahrnovat také výpočet míry nejistoty, která dává představu o důvěře, kterou je třeba rekonstrukci záznamu přikládat.

V této kapitole jsou nastíněny a diskutovány některé klíčové prvky statistického procesu popsaného v předchozím odstavci a zmíněného v dalších kapitolách této zprávy. Pohled na statistickou analýzu ze základnější úrovně pomůže objasnit některé metodiky používané při rekonstrukci povrchové teploty a poukázat na různé typy nejistot spojených s těmito různými metodami. Řešení četných metodických rozdílů a kritiky rekonstrukce pomocí proxy přesahuje rámec této kapitoly, ale budeme se zabývat některými klíčovými otázkami souvisejícími s časovou korelací, použitím hlavních komponent a interpretací validačních statistik. Jako konkrétní příklad se tato kapitola zaměřuje na roční průměrnou teplotu povrchu severní polokoule rekonstruovanou z proxy dat s ročním rozlišením, jako jsou letokruhy stromů. Základní principy však lze zobecnit i na jiné klimatické proxy a další meteorologické proměnné. Pomocí těchto metod lze také reprodukovat prostorově rozlišené rekonstrukce, ale diskuse o této aplikaci není v rozsahu této kapitoly možná.

LINEÁRNÍ REGRESE A REKONSTRUKCE PROXY

Nejběžnější forma rekonstrukce zástupných údajů je založena na použití vícerozměrné lineární regrese. Tato metodika vyžaduje dva klíčové předpoklady:

1. *Linearita*: Existuje lineární statistický vztah mezi zástupnými ukazateli a očekávanou hodnotou klimatické proměnné.

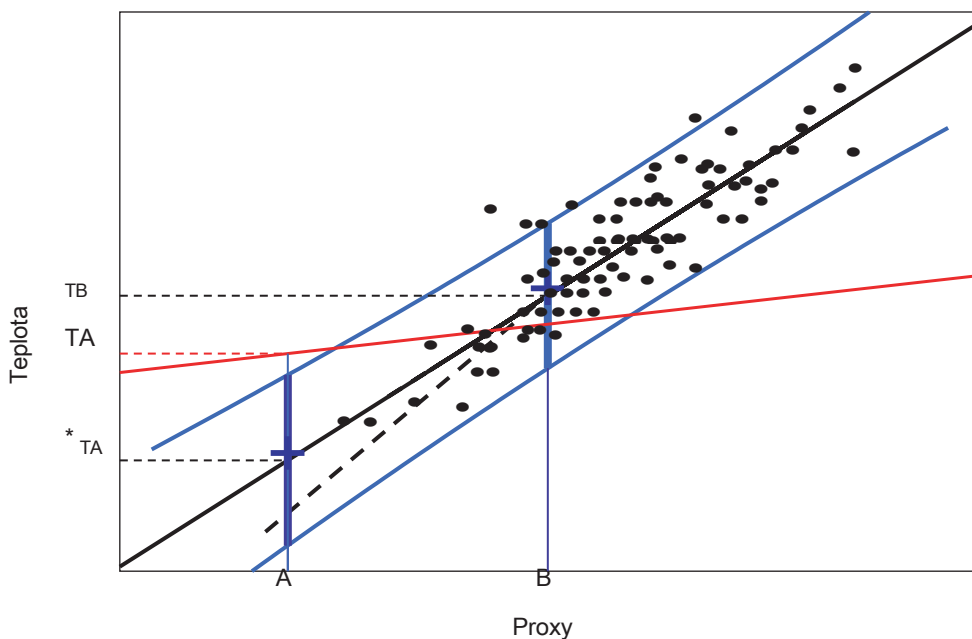
2. *Stacionarita*: Statistický vztah mezi zástupnými ukazateli a klimatickou proměnnou je stejný po celé období kalibrace, validace a rekonstrukce. Všimněte si, že stacionarita vztahu nevyžaduje stacionaritu samotných řad, což by znamenalo konstantní střední hodnoty, konstantní rozptyly a časově homogenní korelace.

Tyto dva předpoklady mají přesné matematické formulace a řeší dvě klíčové otázky týkající se rekonstrukcí klimatu: (1) Jak souvisí proxy s klimatickou proměnnou? (2) Je tento vztah konzistentní jak v instrumentálním období, tak v dřívějších dobách? Ve statistické terminologii tyto předpoklady tvoří statistický model, protože definují statistický vztah mezi daty.

Ilustrace

Na obrázku 9-1 je jednoduchá ilustrace s použitím jediného zástupce pro předpověď teploty. Je zde zobrazeno 100 dvojic bodů, které lze považovat za hypotetickou roční řadu proxy dat a odpovídajících instrumentálních měření povrchové teploty za 100leté kalibrační období. Plná černá čára je lineární fit na tato data neboli kalibrace, která tvoří základ pro předpovědi teplot v dalších časových obdobích. Zde je předpovědi teploty na základě proxy s hodnotou A_{TA} a proxy s hodnotou B předpovídá teplotu T_B .

Zakřivené modré čáry na obrázku 9-1 znázorňují chybu kalibrace neboli nejistotu předpovědi na základě kalibrace (technicky 95 % interval předpovědi, který s pravděpodobností 0,95 pokrývá neznámou teplotu), což je standardní součást regresní analýzy. Na tomto obrázku je nejistota spojená s předpověďmi teploty založenými na proxy datech větší v bodě A než v bodě B. Je to proto, že kalibrační chyby jsou u předpovědi založených na proxy datech zvětšeny.



OBRÁZEK 9-1 Ukázka použití lineární regrese k předpovědi teploty na základě proxy hodnot. V grafu je znázorněno 100 dvojic bodů odpovídajících hypotetickému souboru dat z proxy pozorování a měření teploty. Plná černá čára je přizpůsobená přímka nejmenších čtverců a modré čáry označují 95procentní intervaly předpovědi teploty pomocí tohoto lineárního vztahu. Čárkovaná čára a červená čára označují možné odchylky od lineárního vztahu mezi údaji proxy a údaji o teplotě. Obrázek také znázorňuje předpovědi provedené při hodnotách proxy A a B a odpovídající intervaly předpovědi (široké modré čáry) pro teplotu.

hodnoty, které jsou mimo rozsah zástupných údajů použitých k odhadu lineárního vztahu. V případě více proxy údajů použitých k předpovědi teploty není možné použít dvourozměrný graf pro znázornění přizpůsobeného statistického modelu a nejistot. Stejně jako v případě jedné proxy se však chyby předpovědi při použití několika proxy budou zvyšovat s tím, jak se hodnoty budou odchylovat od hodnot pozorovaných v kalibračním období.

Variabilita regresních předpovědí

Přísně vzato, předpoklad 1 předpokládá přímkový vztah mezi průměrnou hodnotou klimatické proměnné, danou zástupnou veličinou, a hodnotou zástupné veličiny. Tento detail má praktický význam v tom, že potenciálně snižuje variabilitu rekonstruovaných řad, což lze rovněž ilustrovat pomocí obrázku 9-1. Všimněte si například, že u proxy hodnoty B existuje určitá variabilita instrumentálních měření teploty (tj. v blízkosti bodu B je více teplotních měření, z nichž většina neleží na kalibrační přímce). Odhady teplot v minulosti pomocí proxy dat v blízkosti bodu B však vždy poskytnou stejnou teplotu, konkrétně T_B , a nikoliv korelativní rozptyl teplot. Tento rozdíl je zcela na místě, protože T_B je nejpravděpodobnější hodnota teploty pro každé proxy měření, které dává B. Obecně platí, že předpovědi z regrese budou mít menší variabilitu než skutečné hodnoty, takže časové řady rekonstruovaných teplot nebudou plně reprodukovat variabilitu zjištěnou v instrumentálním záznamu.

Jedním ze způsobů, jak posoudit metody rekonstrukce teplot, je použít je na syntetickou historii, u níž jsou všechny teploty známy. Zorita a von Storch (2005) a von Storch et al. (2004) provedli takovýto postup s použitím teplotních výstupů z klimatického modelu ECHO-G. Tito autoři zkonstruovali pseudoproxy tak, že odebrali vzorky teplotního pole v místech, která použili Mann et al (1998), a poškodili je rostoucí úrovní bílého šumu. Poté rekonstruovali průměrnou teplotu severní polokoule jak regresními metodami, tak příbuznou metodou Manna et al. a zjistili, že v obou případech dochází k zeslabení rozptylu rekonstrukce vzhledem k "pravé" časové řadě teplot, přičemž zeslabení se zvyšuje s rostoucím rozptylem šumu.

Tento jev, který identifikovali Zorita a von Storch (2005) a další, není neočekávaný. V rámci kalibračního období se podíl rozptylu teploty, který je vysvětlován pomocí proxies, přirozeně snižuje s rostoucí úrovní šumu proxies. Pokud je pak regresní rovnice použita k rekonstrukci teplot pro jiné období, během něhož jsou proxy statisticky podobné těm z kalibračního období, lze očekávat, že zachytí podobnou část rozptylu.

Některé jiné přístupy k rekonstrukci (např. Moberg et al. 2005b) poskytují rekonstruovanou řadu, která má variabilitu podobnou pozorované teplotní řadě. Tyto přístupy zahrnují alternativy k běžným regresním metodám, jako je inverzní regrese a totální regrese nejmenších čtverců (Hegerl 2006), které nepodléhají atenuaci. Takové metody mohou zabránit zavádějícímu dojmu, který by mohl vyvolat graf zeslabeného teplotního signálu, ale dělají to za určitou cenu: Přímá regrese poskytuje nejpřesnější rekonstrukci ve smyslu střední kvadratické chyby, takže tyto ostatní metody se vzdávají přesnosti. Vrátime-li se k příkladu na obrázku 9-1, použití přímkového vztahu je nejlepší předpovědí, kterou lze z těchto dat vytvořit, a jakákoli inflace variability přesnost rekonstrukce zhorší.

Odchylky od předpokladů

Přerušovaná čára na obrázku 9-1 představuje hypotetickou odchylku od přísného lineárního vztahu mezi proxy daty a teplotou. To ilustruje porušení předpokladu linearity, protože pro nižší hodnoty proxy není vztah stejný, jako je dán (přímou) přímkou nejmenších čtverců. Pokud přerušovaná přímkou popisuje přesnější zobrazení vztahu mezi hodnotami proxy a měřením teploty při nižších hodnotách proxy, pak použití přerušované přímky povede k odlišným rekonstruovaným teplotním řadám.

Lineární vztah mezi teplotou a zástupnými proměnnými může být také ovlivněn tím, zda jsou proměnné detrendovány. Pokud mají časové řady teploty a zástupné veličiny společný trend, ale po odstranění trendů nejsou korelované, může regresní analýza poskytnout výrazně odlišné výsledky. Regrese provedená bez předchozího odstranění trendu by mohla vykazovat silný vztah, zatímco regrese s detrendací by mohla být slabá. Rozhodnutí, zda zahrnout trend či nikoli, by mělo vycházet z vědeckého poznání podobností či rozdílů vztahu v delším a kratším časovém horizontu.

Odchylka od předpokladu stacionarity je znázorněna červenou čarou na obrázku 9-1. Předpokládáme, že v jiném období, než je kalibrační období, jsou proxy a teplota v průměru spojeny červenou čarou, tj. jiným lineárním vztahem než v kalibračním období. Pro přesnou rekonstrukci bychom chtěli použít tuto červenou přímkou a odhad pro teplotu v proxy hodnotě A je na obrázku označen T_{A^*} .

Předpoklady linearity i stacionarity lze ověřit pomocí tréninku. a období ověřování přístrojového záznamu. Pokud vztah není v trénovacím období lineární, lze použít různé objektivní statistické přístupy k popisu komplikovanějšího vztahu, než je lineární. Kromě toho lze porovnat účinek použití detrendovaných a nezpracovaných proměnných. Stacionaritu lze testovat i pro validační období, ačkoli ve většině případů bude použití zástupného vztahu zahrnovat extrapolaci mimo rozsah pozorovaných hodnot, jako je tomu v případě bodu A na výše uvedeném obrázku. V případech, jako je tento, se extrapolace musí rovněž opírat o vědecký kontext své platnosti; to znamená, že je třeba poskytnout vědecký základ pro předpokládaný vztah.

Rozdíl mezi předpoklady použitými k rekonstrukci teplot a dalšími předpoklady potřebnými k vytvoření statistických měř nejistoty těchto rekonstrukcí je zásadní. Například hranice chyb na obrázku 9-1 jsou založeny na statistických předpokladech o tom, jak se teplota odchyluje od přesné lineární závislosti. Tyto předpoklady lze také ověřit pomocí tréninkového a kalibračního období a často lze použít složitější regresní metody k úpravě konkrétních rysů v datech, které porušují předpoklady. Jedním z příkladů je časová korelace mezi datovými body, která je diskutována v následující části.

Inverzní regrese a statistická kalibrace

Rekonstrukce teploty nebo jiné klimatické proměnné z proxy, jako je parametr letokruhů stromů, se formálně podobá statistické kalibraci měřicího přístroje. Statistická kalibrace se skládá ze sledu experimentů, při nichž je jeden faktor (např. teplota) nastaven na přesné, známé hodnoty,

a na odezvě (např. na proxy) se provede jedno nebo více měření. Následně se v druhém řízeném experimentu za stejných podmínek změří odezva pro neznámou úroveň faktoru a regresní vztah se použije k odvození hodnoty faktoru. Tento přístup je známý jako inverzní regrese (Eisenhart 1939), protože role odezvy a faktoru jsou obrácené oproti přímější predikci znázorněné na obrázku 9-1. V tomto případě se jedná o inverzní regresi. Připojení nejistoty k výsledku není triviální, ale jsou známy konzervativní aproximace (Fieller 1954). Ve statistické literatuře se stále diskutuje o tom, za jakých okolností jsou lepší inverzní nebo přímé metody (Osborne 1991).

Problém rekonstrukce teploty do tohoto rámce nezapadá, protože teplota ani proxy hodnoty nejsou kontrolovány. Užitečným modelem je považovat proxy a cílovou klimatickou proměnnou za dvourozměrné pozorování komplexního systému. Statistické řešení problému rekonstrukce nyní spočívá ve stanovení podmíněného rozdělení nepozorované části dvojice, teploty, vzhledem k hodnotě pozorované části, proxy. Brown (1982) to označuje také jako problém náhodné kalibrace. Pokud je dvourozměrné rozdělení Gaussovo, pak je i podmíněné rozdělení Gaussovo, se střední hodnotou, která je lineární funkcí proxy a konstantním rozptylem. Ze vzorku kompletně pozorovaných dvojic poskytují výše uvedené regresní metody nestranné odhady interceptu a sklonu této lineární funkce. Ve skutečnosti se neočekává, že by se dvourozměrné rozdělení přesně řídilo Gaussovým rozdělením. V takovém případě je lineární funkce pouze aproximací, nicméně adekvátnost těchto aproximací lze ověřit na základě dat pomocí standardních regresních diagnostických metod. U více zástupných ukazatelů se rozměr společného rozdělení zvětšuje, ale výpočet podmíněného rozdělení je přímým zobecněním z dvourozměrného (jednoprocentního) případu.

Regrese s korelovanými daty

Ve většině případů jsou kalibrace založeny na proxy datech a datech o teplotě, které na sebe časově navazují. Geofyzikální data jsou však často autokorelovaná, což má za následek snížení efektivní velikosti vzorku dat. Toto zmenšení velikosti vzorku snižuje přesnost odhadovaných regresních koeficientů a způsobuje, že standardní chyba je během kalibračního období podhodnocena. Aby se předešlo těmto problémům a vytvořila se věrohodná míra nejistoty, musí se zohlednit autokorelace vstupních dat.

Statistická strategie pro zohlednění korelace v datech použitých v regresním modelu je dvojího druhu. První část spočívá ve specifikaci modelu pro korelační strukturu a použití modifikovaných regresních odhadů (zobecněné nejmenší čtverce), které dosahují lepší přesnosti. Správnost specifikace lze testovat například pomocí Durbinovy-Watsonovy statistiky (Durbin a Watson 1950, 1951, 1971). Druhou částí strategie je uvědomit si, že korelační struktura je obvykle příliš složitá na to, aby ji bylo možné zachytit pomocí úsporných modelů. Tuto strukturu může odhalit významná Durbin-Watsonova statistika nebo jiný test, nebo může být podezřelá z jiných důvodů. V takovém případě lze standardní chyby odhadovaných koeficientů založené na modelu nahradit robustnějšími verzemi, o nichž pojednávají například Hinkley a Wang (1991). Pro data časových řad popisuje Andrews (1991) odhady standardních chyb, které jsou konzistentní v přítomnosti autokorelovaných chyb s měnicími se rozptyly. Pro data časových řad se korelace obvykle modelují jako *stacionární*; parsimonious

modely pro stacionární časové řady, jako je ARMA, zpopularizovali Box a Jenkins (Box et al. 1994). Všimněte si, že tento přístup *nevyžaduje, aby* teplota ani proxy byly stacionární, pouze chyby v regresní rovnici.

Nejistota rekonstrukce a časová korelace

Údaj o nejistotě rekonstrukce je důležitou součástí každého zobrazení samotné rekonstrukce. Obvykle má podobu:

$$\text{Rekonstrukce} \pm 2 \times \text{standardní chyba,}$$

a standardní chyba je dána běžnými regresními výpočty.

Střední kvadratická chyba předpovědi je kvadrátem standardní chyby a je součtem dvou členů. Jedním z nich je rozptyl chyb v regresní rovnici, který se odhaduje z kalibračních údajů a může být upraven s ohledem na rozdíly mezi chybami kalibrace a validačními chybami. Tento člen je stejný pro všechna data rekonstrukce. Druhým členem je rozptyl chyby odhadu regresních parametrů, který se mění v závislosti na hodnotách zástupných veličin a také na stupni autokorelace chyb. Tento druhý člen je obvykle malý pro datum, kdy jsou proxy hodnoty v rozsahu reprezentovaném kalibračními daty, ale může být velký, když se rovnice použije k extrapolaci na hodnoty proxy mimo tento rozsah.

Vyhlazené rekonstrukce

Rekonstrukce se často zobrazují ve vyhlazené podobě, a to jednak proto, že hlavní rysy jsou vyhlazením zvýrazněny, jednak proto, že rekonstrukce nízkofrekvenčních rysů může být přesnější než krátkodobé chování. Obě části rozptylu predikce jsou vyhlazováním ovlivněny, ale různým způsobem. Vliv na první z nich závisí na korelační struktuře chyb, což může vyžadovat další modelování, ale vždy se jedná o zmenšení velikosti. Druhý člen závisí na vyhlazených hodnotách proměnných a může se buď zvětšit, nebo zmenšit, ale obvykle se stává významnější částí výsledné směrodatné chyby, zejména při extrapolaci.

REGRESE HLAVNÍCH KOMPONENT

Základní myšlenkou regrese hlavních komponent je nahradit prediktory (tj. jednotlivé ukazatele) menším počtem objektivně určených proměnných, které jsou lineárními kombinacemi původních ukazatelů. Nové proměnné jsou navrženy tak, aby obsahovaly co nejvíce informací z původních zástupných ukazatelů. S rostoucím počtem hlavních komponent se regrese hlavních komponent blíží regresi na úplném souboru zástupných proměnných. V praxi se však počet hlavních komponent obvykle udržuje malý, aby se předešlo nadměrnému přizpůsobení a následné ztrátě predikčních schopností. Žádná známá statistická teorie nenaznačuje, že omezení počtu hlavních komponent použitých v regresi vede k dobrým předpovědím, ačkoli se tato praxe v mnoha aplikacích osvědčila. S touto myšlenkou přišli do dendroklimatologie Fritts et al. (1971) a zabývali se jí Briffa a Cook (1990).

Jolliffe (2002) popisuje mnoho problémů při použití analýzy hlavních komponent, včetně regrese hlavních komponent, jak se používá v mnoha oblastech vědy.

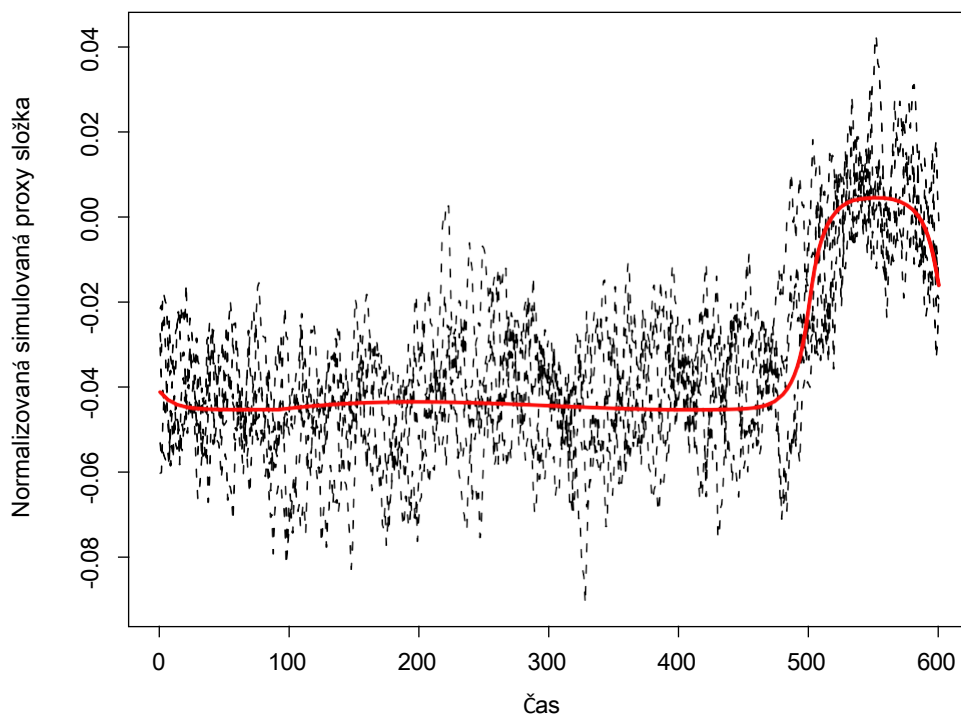
Hlavní komponenty obsahují maximum informací v tom smyslu, že lze co nejpřesněji reprodukovat celý soubor zástupných proměnných, pokud jsou dány pouze hodnoty nových proměnných (Johnson a Wichern 2002, Suppl. 8A). Obecně je třeba posuzovat soubor hlavních komponent vzatých dohromady jako skupinu, protože jsou společně použity k vytvoření rekonstrukce. Porovnávání pouze jednotlivých hlavních komponent mezi dvěma různými přístupy může být zavádějící. Například každá ze dvou skupin hlavních komponent může poskytovat stejně platné aproximace k úplnému souboru zástupných komponent. K této rovnocennosti může dojít, aniž by bylo možné porovnat na bázi jedna ku jedné hlavní komponenty v jedné skupině s hlavními komponentami v druhé skupině.

Nepřesné hlavní složky

McIntyre a McKittrick (2003) prokázali, že za určitých podmínek může vedoucí hlavní komponenta vykazovat falešný trend, což by pak mohlo vést k falešnému trendu v rekonstrukci založené na proxy. Abychom viděli, jak k tomu může dojít, předpokládejme, že bychom místo proxy klimatických dat jednoduše použili náhodný vzorek autokorelovaných časových řad, které by neobsahovaly koherentní signál. Pokud jsou tyto simulované proxy standardizovány jako anomálie vzhledem ke kalibračnímu období a použity k vytvoření hlavních komponent, první komponenta má tendenci vykazovat trend, i když samotné proxy nemají žádný společný trend. První komponenta v podstatě zachycuje ty proxy, které náhodně vykazují odlišné hodnoty mezi kalibračním obdobím a zbytkem dat. Pokud je tato složka použita sama o sobě nebo ve spojení s malým počtem neovlivněných složek k rekonstrukci, může výsledná rekonstrukce teploty vykazovat trend, i když jednotlivé proxy nevykazují. Obrázek 9-2 ukazuje výsledek jednoduché simulace podle McIntyry a McKittricka (2003) (počítačový kód je uveden v příloze B). V každé simulaci bylo zkonstruováno 50 autokorelovaných časových řad o délce 600, bez koherentního signálu. Každá z nich byla vycentrována na průměr posledních 100 hodnot a byla nalezena první hlavní komponenta. Obrázek ukazuje překrytí prvních složek z pěti takových simulací. Hlavní komponenty mají libovolné znaménko, které zde bylo zvoleno tak, aby posledních 100 hodnot bylo v průměru vyšší než zbytek.

Hlavní komponenty výběrových dat odrážejí tvar odpovídajících vlastních vektorů populační kovarianční matice. První vlastní vektor kovarianční matice pro tuto simulaci je červená křivka na obrázku 9-2, která ukazuje přesný tvar falešného trendu, který by hlavní komponenta v tomto případě vnesla do fitovaného modelu.

Toto cvičení ukazuje, že základní linie, vzhledem k níž se anomálie počítají, může hlavní komponenty ovlivnit neočekávaným způsobem. Huybers (2005) v komentáři k McIntyreovi a McKittrickovi (2005a) poukazuje na to, že normalizace rovněž ovlivňuje výsledky, což McIntyre a McKittrick (2005b) ve své odpovědi Huybersovi ještě zdůrazňují. Výpočty hlavních komponent se často provádějí na korelační matici získané normalizací každé proměnné podle její výběrové směrodatné odchylky. Proměnné v různých fyzikálních jednotkách zjevně vyžadují nějaký druh normalizace, aby se dostaly na společnou stupnici, ale i proměnné, které jsou fyzikálně ekvivalentní nebo



OBRÁZEK 9-2 Pět simulovaných hlavních komponent a odpovídající vlastní vektor populace. Podrobnosti viz text.

normalizované na společnou stupnici mohou mít velmi rozdílné rozptyly. Huybersovy komentáře o hustotě letokruhů stromů, které mají mnohem menší rozptyly než šířky, a to i po převodu do bezrozměrné "standardizované" formy. V tomto případě lze argumentovat pro použití proměnných bez další normalizace. Proměnné s vyššími rozptyly však mají tendenci k odpovídajícím vyšším příspěvkům k hlavním komponentám, takže rozhodnutí, zda vyrovnat rozptyly, či nikoli, by mělo být založeno na vědeckých úvahách o klimatických informacích zastoupených v každé z proxy.

Každá hlavní komponenta je váženou kombinací jednotlivých zástupných řad. Pokud se tyto řady skládají ze společného signálu a nekoherentního šumu, má nejlepší odhad společného signálu váhy úměrné citlivosti proxy vydělené rozptylem šumu. Tyto váhy se obecně neshodují s váhami v hlavní komponentě vypočtenými z nezpracovaných nebo standardizovaných proxy řad, z nichž každá je proto neoptimální. V každém případě by hlavní komponenty měly být konstruovány tak, aby bylo dosaženo nízkorozměrné reprezentace celého souboru zástupných proměnných, která zahrnuje většinu klimatických informací v něm obsažených.

VALIDACE A PREDIKČNÍ SCHOPNOSTI PROXY REKONSTRUKCE

Úkolem ověřovacího období je poskytnout nezávislé posouzení přesnosti metody rekonstrukce. Jak bylo uvedeno výše, během kalibračního období je možné statistický model nadměrně přizpůsobit, což má za následek podhodnocení chyby předpovědi. Vyhrazení podmnožiny dat pro validaci je přirozeným způsobem, jak tento problém kompenzovat. Pokud je validační období nezávislé na kalibračním období, nebudou případné míry dovedností použité k posouzení kvality rekonstrukce zkrasleny možným nadměrným přizpůsobením během kalibračního období. Přirozeným problémem při validaci rekonstrukce klimatu je, že validační období je omezeno na historický záznam, takže není možné získat přímý odhad dovednosti rekonstrukce v dřívějších obdobích. Vzhledem k autokorelaci ve většině geofyzikálních časových řad nemůže být validační období sousedící s kalibračním obdobím skutečně nezávislé; pokud je autokorelace krátkodobá, nedostatek nezávislosti vážně nezkresluje výsledky validace.

Měřítko predikčních schopností

Mezi běžné míry používané k hodnocení přesnosti statistických předpovědí patří střední kvadratická chyba (MSE), snížení chyby (RE), koeficient efektivity (CE) a kvadratická korelace (r^2). Matematické definice těchto veličin jsou uvedeny v rámečku 9.1. MSE je měřítkem toho, jak blízko je soubor předpovědí skutečným hodnotám, a je široce používán v geovědách a statistice. Obvykle se normalizuje a prezentuje ve formě statistiky RE (Fritts 1976) nebo statistiky CE (Cook et al. 1994). Statistika RE porovnává MSE rekonstrukce s MSE rekonstrukce, která je konstantní v čase a jejíž hodnota odpovídá výběrovému průměru kalibračních dat. Pokud má rekonstrukce nějakou vypovídací hodnotu, očekávalo by se, že bude lepší než pouhý výběrový průměr za kalibrační období, tj. očekávalo by se, že RE bude větší než nula.

Na druhé straně CE porovnává MSE s výkonem rekonstrukce, která je v čase konstantní a jejíž hodnota odpovídá výběrovému průměru validačních dat. Tato druhá konstantní rekonstrukce závisí na validačních datech, která jsou z procesu kalibrace vyřazena, a proto představuje demandingnější srovnání. Ve skutečnosti bude CE vždy menší než RE a rozdíl se zvětšuje s tím, jak se zvětšuje rozdíl mezi průměry vzorků pro validační a kalibrační období.

Pokud má kalibrace nějakou vypovídací hodnotu, lze očekávat, že bude lepší než pouhý průměr vzorku za validační období, a z tohoto důvodu je CE obzvláště užitečným měřítkem. Jako míra asociace mezi dvěma proměnnými se obvykle používá statistika kvadratické korelace, označovaná jako r^2 . Konkrétně r^2 měří sílu lineárního vztahu mezi dvěma proměnnými, pokud je lineární shoda určena regresí. Například korelace mezi proměnnými na obrázku 9-1 je 0,88, což znamená, že regresní přímka vysvětluje $100 \times 0,88^2 = 77,4$ % variability hodnot teploty. Hodnota r^2 však měří, jak dobře odpovídá určitá lineární funkce předpovědí datům, nikoliv jak dobře fungují samotné předpovědi. Koeficienty v této lineární funkci nelze vypočítat bez znalosti předpovídaných hodnot, takže sám o sobě není užitečným ukazatelem přínosu. Vysoká hodnota CE

BOX 9.1 Měření přesnosti rekonstrukce

Nechť y_t označuje teplotu v čase t a $y_{t,c}$ předpověď založenou na rekonstrukci proxy.

Střední kvadratická chyba (MSE)

$$MSE(y) = \frac{1}{N} \sum (y_t - \hat{y}_t)^2,$$

kde součet na pravé straně rovnice se vztahuje k časovému období (buď kalibračnímu, nebo validačnímu) a N je počet časových bodů.

Snížení statistické chyby (RE)

$$RE = 1 - \frac{MSE(\hat{y})}{MSE(y_c)},$$

kde $MSE(y_c)$ je střední kvadratická chyba použití průměrné teploty vzorku za kalibrační období (konstanta, y_c) k předpovědi teplot v zájmovém období:

$$MSE(y_c) = \frac{1}{N} \sum (y_t - y_c)^2$$

Koeficient účinnosti (CE)

$$CE = 1 - \frac{MSE(\hat{y})}{MSE(y_i)},$$

kde $MSE(y_i)$ je střední kvadratická chyba použití výběrového průměru za sledované období (y_i) jako prediktoru teplot během sledovaného období:

$$MSE(y_i) = \frac{1}{N} \sum (y_t - y_i)^2$$

Korelace na druhou (r^2)

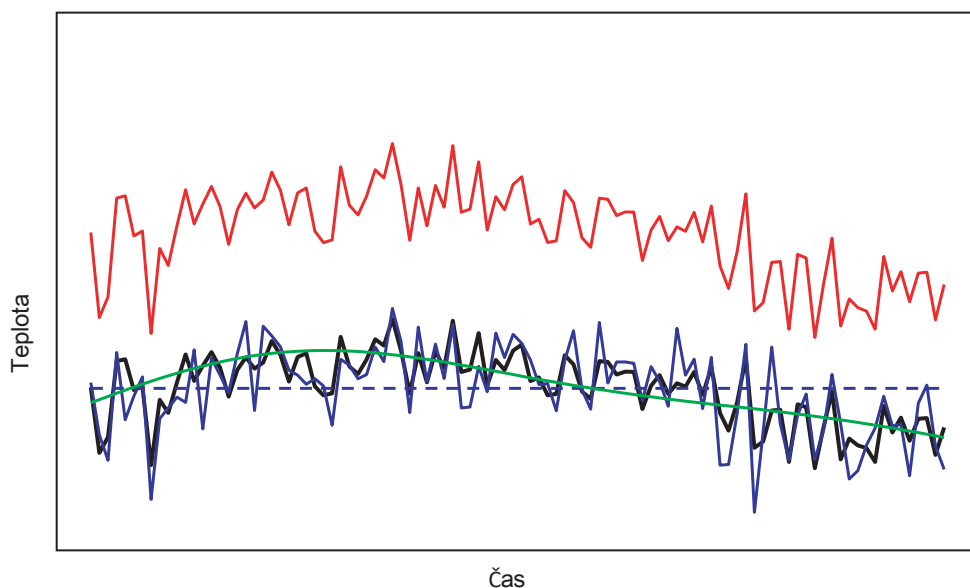
$$r^2 = \frac{\left[\sum (y_t - \bar{y})(\hat{y}_t - \bar{\hat{y}}) \right]^2}{\sum (y_t - \bar{y})^2 \sum (\hat{y}_t - \bar{\hat{y}})^2}$$

Pokud jsou $y_{t,c}$ předpovědi z lineární regrese y_t na ukazatele a zájmové období je kalibrační období, pak RE, CE a r^2 jsou si rovny. V opačném případě je CE menší než RE i r^2 .

hodnota však bude mít vždy vysoké r^2 , a to je další důvod, proč uvažovat o CE.

Znázornění CE a r^2

Na obrázku 9-3 jsou uvedeny příklady hypotetické teplotní řady a několika rekonstrukčních řad, kde černá čára představuje skutečné teploty a barevné čáry různé rekonstrukce. Červená příímka má $r^2 = 1$, ale CE = -18,9 a je



OBRÁZEK 9-3 Hypotetická teplotní řada (černá čára) a čtyři možné rekonstrukce.

příklad dokonale korelované rekonstrukce bez schopnosti predikce. Přerušovaná modrá čára je na úrovni střední teploty a její r^2 i CE jsou nulové. Modrá a zelená rekonstruovaná čára mají obě CE 0,50. Aby byla některá z těchto rekonstrukcí lepší než pouhá střední hodnota, musí vykazovat určitý stupeň korelace s teplotami. V tomto případě je r^2 0,68 pro modrou linii a 0,51 pro zelenou linii.

Navzdory společnému CE tyto dvě rekonstrukce odpovídají teplotním řadám různým způsobem. Modrá křivka více koreluje s krátkodobými výkyvy a zelená křivka sleduje dlouhodobější výkyvy teplotní řady. Rozdíl mezi modrou a zelenou křivkou ilustruje, že samotná statistika CE neobsahuje všechny užitečné informace o chybě rekonstrukce.

Rozlišování mezi RE a CE a doba platnosti

Kombinace vysokého RE a nízkého CE nebo r^2 znamená, že rekonstrukce poměrně dobře identifikovala změnu průměrných hladin mezi kalibračním a validačním obdobím, ale nedokázala sledovat změny v rámci validačního období. Jedním ze způsobů, jak může k tomuto nesouladu dojít, je, že proxy a teploty jsou v kalibračním období spojeny společným trendem. Pokud je tento trend velký, může to mít za následek vysoký RE. Pokud validační období nemá tak silný trend a proxy nejsou schopné předpovídat kratší časové výkyvy teplot, pak může být RE podstatně nižší. Rekonstrukce mohou například dělat jen tolik.

stejně jako průměrná úroveň v ověřovacím období, v takovém případě se CE bude blížit nule. Ideální validační postup by měřil dovednosti v různých časových škálách nebo v různých frekvenčních pásmech pomocí waveletových výpočtů nebo výpočtů výkonového spektra. Bohužel nedostatek validačních dat výrazně omezuje jejich citlivost. Například zaměření na změny v dekadách nebo delších časových škálách s 45 lety validačních dat, které použili Mann et al. (1998), by poskytlo statistiku s pouhými $(2 \times 45 \div 10) = 9$ stupni volnosti, což je příliš málo na to, aby bylo možné adekvátně kvantifikovat dovednosti. Tato diskuse také motivuje volbu validačního období, které vykazuje stejný druh variability jako kalibrační období. Pouhé použití nejstarší části přístrojové řady nemusí být pro validaci tou nejlepší volbou.

Stanovení nejistoty a výběr ze statistických metod

Validační období lze kromě objektivního posouzení přesnosti rekonstrukce využít také k úpravě měr nejistoty rekonstrukce. Například MSE vypočtená pro validační období poskytuje užitečné měřítko přesnosti rekonstrukce; druhou odmocninu MSE lze použít jako odhad standardní chyby rekonstrukce. Rekonstrukce, které mají špatnou validační statistiku (tj. nízkou CE), budou mít odpovídajícím způsobem široké meze nejistoty, a tak je lze objektivně považovat za nespolehlivé. Statistika CE blízká nule nebo záporná navíc naznačuje, že rekonstrukce není lepší než průměr, a její dovednost pro časové průměry kratší než validační období tak bude nízká. Některé nedávné výsledky uvedené v tabulce 1S Wahla a Ammanna (v tisku) naznačují, že jejich rekonstrukce, která používá stejný postup a úplný soubor zástupných ukazatelů jako Mann et al. (1999), poskytuje hodnoty CE v rozmezí od 0,103 do -0,215 v závislosti na tom, jak daleko do minulosti je rekonstrukce provedena. Ačkoli se některé diskuse zaměřují na to, kdy je validační statistika, jako je CE nebo RE, významná, smysluplnějším přístupem může být soustředit se na implicitní intervaly předpovědi pro danou rekonstrukci. I nízká hodnota CE může stále poskytovat intervaly předpovědí, které jsou užitečné pro vyvození konkrétních vědeckých závěrů.

Práce Bürger a Cubasch (2005) se zabývá různými variantami rekonstrukční metody a dospívá k 64 různým analýzám. Ačkoli neuvádějí hodnotu CE, zkoumání obrázku 1 v jejich práci naznačuje, že mnoho variant rekonstrukcí bude mít nízkou hodnotu CE a že výběr rekonstrukce na základě její hodnoty CE by mohl být užitečným způsobem, jak zúžit výběr pro rekonstrukci. Použití CE k posouzení přednosti rekonstrukce je známé jako křížová validace a je běžnou statistickou technikou pro výběr mezi konkurenčními modely a podmnožinami dat. Pokud je období validace nezávislé na období kalibrace, křížová validace zabraňuje mnoha problémům s nadměrným přizpůsobením, pokud by se modely vybíraly jednoduše na základě RE.

KVANTIFIKACE PLNÉ NEJISTOTY REKONSTRUKCE

Statistický rámec založený na regresi poskytuje základ pro přiřazení nejistých odhadů k rekonstrukcím. Je však třeba zdůraznit, že se jedná pouze o statistickou nejistotu a že z vědeckého hlediska je třeba se zabývat i dalšími zdroji chyb. Tyto zdroje chyb jsou specifické pro každou proxy a jsou podrobně diskutovány v kapitolách 3-8 této zprávy. Kvantifikace statistické nejistoty závisí na výše uvedených předpokladech o stacionaritě a linearitě.

úprava časové korelace při kalibraci proxy a rozumné použití hlavních komponent nebo jiných metod redukce dat. Na základě těchto předpokladů a přibližného Gaussova rozdělení šumu ve vztahu mezi teplotou a proxy lze pomocí standardních technik (viz např. Draper a Smith 1981) odvodit intervaly předpovědi pro rekonstruované teploty. Tento výpočet také poskytne teoretickou MSE pro validační období, kterou lze porovnat se skutečnou střední kvadratickou chybou validace jako kontrolu metody.

Jednou z užitečných úprav je zvýšení odhadované standardní chyby předpovědi (nikoli však samotné rekonstrukce) v předpovědích tak, aby se shodovaly s pozorovanou CE nebo jinými mírami dovednosti během validačního období. Tím se zohlední dodatečná nejistota v předpovědích, kterou nelze odvodit přímo ze statistického modelu. Další úpravou je použití simulačních technik Monte Carlo k zohlednění nejistoty při výběru hlavních komponent. Často se na teplotní rekonstrukce aplikují deseti-, třiceti- nebo padesátileté klouzavé průměry, aby se odhadly dlouhodobé teplotní průměry. Poněkud složitějším výpočtem, ale stále standardní technikou v regresní analýze, by bylo odvození kovarianční matice nejistot v rekonstrukcích v posloupnosti let. To by umožnilo poskytnout statisticky přísnou standardní chybu při vyhlazování rekonstrukcí založených na proxy.

Interpretace intervalů spolehlivosti

Běžným způsobem, jak informovat o nejistotě rekonstrukce, je vykreslení grafu rekonstruované teploty pro daný rok s horní a dolní hranicí 95procentního intervalu spolehlivosti pro kvantifikaci nejistoty. Obvykle se vykresluje rekonstruovaná křivka s intervaly spolehlivosti tvořícími pásmo kolem odhadu. Část rozptylu, která *není* vysvětlena zástupnými údaji, je spojena s rezidui a jejich rozptyl je jednou ze součástí střední kvadratické chyby předpovědi, která určuje šířku chybového pásma.

Ačkoli je tento způsob znázornění rozsahů nejistot správný, může být snadno nesprávně interpretován. K záměně dochází proto, že nejistota rekonstrukce je znázorněna jako křivka, nikoli jako soubor bodů. Například 95procentní intervaly spolehlivosti, pokud se zkombinují za dobu rekonstrukce, netvoří obálku, která by s 95procentní pravděpodobností obsahovala skutečnou teplotní řadu. Aby se taková obálka vytvořila, musely by se intervaly dále nafouknout koeficientem vypočteným na základě statistického modelu autokorelace, obvykle pomocí techniky Monte Carlo. Takto nafouknuté intervaly by byly platným popisem nejistoty maxima nebo minima rekonstruované teplotní řady.

Při interpretaci tvaru teplotní rekonstrukční křivky vyvstávají i další problémy. Většina teplotních rekonstrukcí vykazuje charakteristickou proměnlivost v čase. Charakteristiky neznámé teplotní řady však mohou být zcela odlišné od charakteristik rekonstrukce, což je třeba mít při interpretaci rekonstrukce vždy na paměti. Můžeme například pozorovat určitou dekadovou variabilitu v rekonstrukci a podobnou variabilitu přisoudit skutečné teplotní řadě. Tento závěr však není oprávněný bez dalších statistických předpokladů, jako je pravděpodobnost, že se určitý vzorec objeví v časově korelované řadě náhodou. Vzhledem k útlumu variability spojenému s regresní metodou a časovým korelacím v rámci proxy záznamu, které nemusí souviset s tempera-

je obtížné kvantifikovat, jak tvar rekonstruované teplotní křivky souvisí se skutečnou teplotní řadou.

Soubory rekonstrukcí

Jeden z přístupů k zobrazení nejistoty rekonstruovaných teplotních řad se již neformálně provádí tak, že se uvažuje vzorek nebo *soubor* možných rekonstrukcí. Zobrazením různých přístupů nebo variant rekonstrukce na stejných osách, jako je obrázek S-1 této zprávy, lze ocenit rozdíly v proměnlivosti a trendech. Problémem tohoto přístupu je, že soubor křivek nelze interpretovat jako reprezentativní vzorek určité populace rekonstrukcí. To platí i pro 64 variant v práci Bürger a Cubasch (2005). Rozdíly v metodice a souborech dat, které tyto rekonstrukce podporují, je činí odlišnými, ale není jasné, zda představují záměrný vzorek z řady možných teplotních rekonstrukcí. Jako alternativa existují statistické metody pro generování souboru teplotních rekonstrukcí, které lze interpretovat tradičnějším způsobem jako náhodný vzorek. To sice vyžaduje další statistické předpoklady o společném rozdělení zástupných ukazatelů a teplot, ale zjednodušuje to interpretaci rekonstrukce. Například pro vyvození závěrů o maximálních hodnotách teplot v minulosti by stačilo vytvořit histogram maxim v různých členech souboru. Rozptyl v histogramu je rigorózní způsob, jak kvantifikovat nejistotu v maximu teplotní rekonstrukce.

10

Klimatické vlivy a klimatické modely

- Hlavními vnějšími klimatickými vlivy za posledních 2000 let jsou sopečné erupce, změny slunečního záření dopadajícího na Zemi a zvýšení množství skleníkových plynů a aerosolů v atmosféře v důsledku lidské činnosti.
- Pro rekonstrukci klimatických vlivů za posledních 2 000 let jsou k dispozici proxy záznamy, ale tyto rekonstrukce klimatických vlivů jsou spojeny se stejnou mírou nejistoty jako rekonstrukce povrchových teplot.
- Skleníkové plyny a troposférické aerosoly se od roku 1 n. l. do roku 1850 měnily jen málo. Vulkanické erupce a kolísání sluneční aktivity byly v tomto období pravděpodobně nejsilnějšími vnějšími vlivy, ale v současné době se odhaduje, že kolísání teplot způsobené těmito vlivy bylo mnohem méně výrazné než oteplování způsobené působením skleníkových plynů od poloviny 19. století.
- Simulace klimatických modelů naznačují, že sluneční a vulkanické vlivy mohly společně způsobit období relativního tepla a chladu během předindustriální části posledních 1 000 let. K simulaci oteplení na konci 20. století je však zapotřebí zvýšení antropogenních skleníkových plynů.

Jak bylo popsáno v kapitole 1, globální průměrná teplota povrchu se mění v závislosti na vnějších vlivech na klimatický systém, které ovlivňují globální energetickou bilanci. Za posledních 2 000 let byly dominantními vlivy přirozené změny slunečního záření a sopečné erupce spolu s novějšími antropogenními vlivy skleníkových plynů, troposférických aerosolů a změnami ve využívání půdy. Tato kapitola se z velké části zaměřuje na přirozené vlivy v předindustriálním období, jejichž údaje pocházejí z některých stejných zdrojů jako proxy důkazy o změnách povrchové teploty, a to z historických záznamů, ledových jader a

letokruhy stromů. Tyto rekonstrukce jsou obvykle spojeny se stejnou mírou nejistoty jako rekonstrukce povrchové teploty.

Klimatické modely se často používají k simulaci odezvy klimatu na změny vnějších vlivů, včetně těch, které naznačují proxy důkazy. K odhadu výkyvů povrchové teploty, které vyplývají z dostupných proxy údajů za posledních 2 000 let, byla použita řada modelů. Klimatické modely lze také použít ke studiu zpětných vazeb, které určují odezvu globální průměrné povrchové teploty na vnější vlivy, a také k odhadu přirozené vnitřní proměnlivosti klimatického systému.

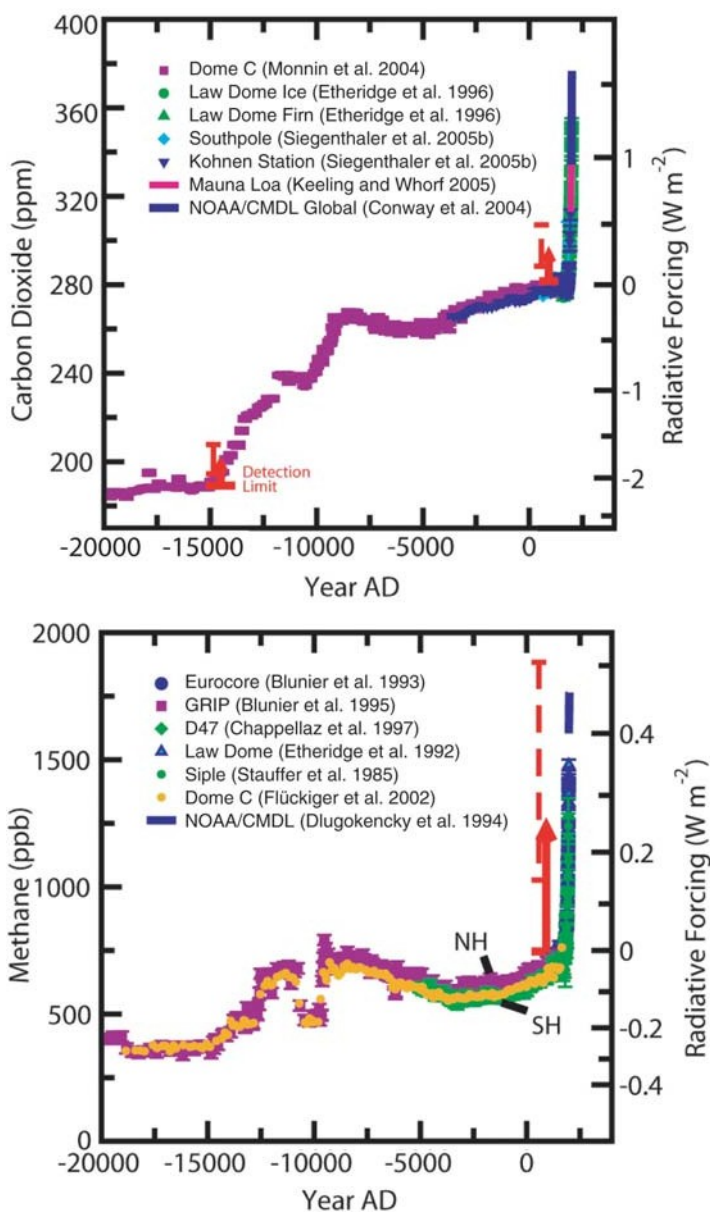
KLIMATICKÉ VLIVY

Teplota Země je dána rovnováhou energie, která do systému Země-atmosféra vstupuje, a energie, která ze systému odchází. Energetická nerovnováha působící na klimatický systém buď zvenčí, nebo v důsledku lidské činnosti se označuje jako *klimatický faktor* (NRC 2005); trvalé klimatické faktory způsobují změny teploty Země, dokud se neobnoví energetická rovnováha. Velikost změny se určuje podle velikosti klimatických sil a zpětných vazeb v klimatickém systému, které zesilují nebo zeslabují účinek těchto sil (NRC 2003b). Klimatické vlivy, které přímo ovlivňují radiační bilanci Země, se označují jako radiační vlivy a obvykle se měří ve watttech na metr čtvereční ($W \cdot m^{-2}$) (NRC 2005). Kladné globální průměrné radiační vlivy mají za následek oteplení globálních průměrných povrchových teplot. Hlavními klimatickými vlivy na povrchové teploty za posledních 2 000 let jsou sopečné erupce, změny v zářivém výkonu Slunce a převážně antropogenní změny skleníkových plynů, troposférických aerosolů a využívání půdy.

Skleníkové plyny

Základními přírodními skleníkovými plyny jsou oxid uhličitý (CO_2), metan (CH_4) a oxid dusný (N_2O). Vodní pára je také skleníkový plyn, který přispívá k největšímu oteplování, ale je považována za zpětnou vazbu, protože její koncentrace je řízena teplotou atmosféry, nikoliv lidskou činností. Kontinuální měření oxidu uhličitého v atmosféře je k dispozici od poloviny 20. století z observatoře Mauna Loa a všechny významné skleníkové plyny jsou od roku 1980 monitorovány globální sítí pro odběr vzorků ovzduší Národního úřadu pro oceán a atmosféru (Keeling a Whorf 2005). Pro předchozí desetiletí a staletí se koncentrace skleníkových plynů získávají analýzou vzduchových bublin zachycených v jádrech a firnu ledu v Antarktidě a Grónsku.

V průběhu glaciálních a interglaciálních cyklů za posledních 650 000 let se množství oxidu uhličitého pohybovalo v rozmezí přibližně 300 ppm (objemových jednotek na milion) během teplých interglaciálních období a přibližně 180 ppm během chladných glaciálních období (Siegenthaler et al. 2005a). Koncentrace metanu a oxidu dusného v atmosféře během meziledových dob nepřesáhly 790 ppb (objemových částí na miliardu), resp. 290 ppb (Spahni et al. 2005). Oxid uhličitý, metan a oxid dusný se v průběhu posledních 2 000 let před průmyslovou érou měnily jen málo (obr. 10-1). Měření v ledových jádrech ukazují, že oxid uhličitý a oxid dusný zůstávaly v rozmezí několika ppm, respektive ppb od svých průměrných koncentrací a v rámci nejistoty údajů (Raynaud et al. 2003, Gerber et al. 2003). Metan kolísal mezi 600 a 750 ppb, měnil se s klimatem a pravděpodobně byl důsledkem kolísání přirozených a raně antropo



OBRÁZEK 10-1 Vývoj oxidu uhličitého a metanu v atmosféře za posledních 22 000 let. Levé osy znázorňují atmosférické koncentrace (všimněte si, že stupnice oxidu uhličitého nezačíná od nuly) a pravé osy znázorňují radiační působení vzhledem k roku 1750, jak bylo vypočteno podle vzorců uvedených v Myhre et al. (1998) a Ramaswamy et al. (2001). Červené šipky označují teoretickou hranici detekce radiačního působení (vzhledem k poslednímu glaciálnímu maximu a předindustriálním podmínkám) v modelu klimatického systému za předpokladu vnitřní variability klimatu nebo prahu detekce 0,2 °C, klimatické rovnováhy a střední citlivosti klimatu 3 °C pro zdvojnásobení oxidu uhličitého. Červené čárkované čáry označují nejistotu detekčního prahu spojenou s rozsahem citlivosti klimatu 1,5 až 4,5 °C. ZDROJ: Joos (2005). Přetištěno se svolením; copyright 2005.

genové zdroje (Blunier et al. 1993, Ruddiman a Thomson 2001, Raynaud et al. 2003, Keppeler et al. 2006). Od počátku průmyslové revoluce (cca 1750) se koncentrace těchto skleníkových plynů v atmosféře výrazně zvýšila. V současné době se výrazně vymykají obálce ledovcovo-meziledovcových výkyvů za posledních 650 000 let. Oxid uhličitý se zvýšil z přibližně 280 ppm v předindustriální době na současné hodnoty kolem 380 ppm. Metan se oproti předindustriálním hodnotám více než zdvojnásobil, mírnější, ale výrazný je nárůst oxidu dusného. Radiační síla způsobená nárůstem těchto a dalších dlouhodobých skleníkových plynů (ve srovnání s rokem 1750 n. l.) činí přibližně $2,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (Joos 2005) (obr. 10-1). To je podstatně více než jakékoli změny nebo trendy v přirozených příčinách, jak je chápeme za posledních 2000 let.

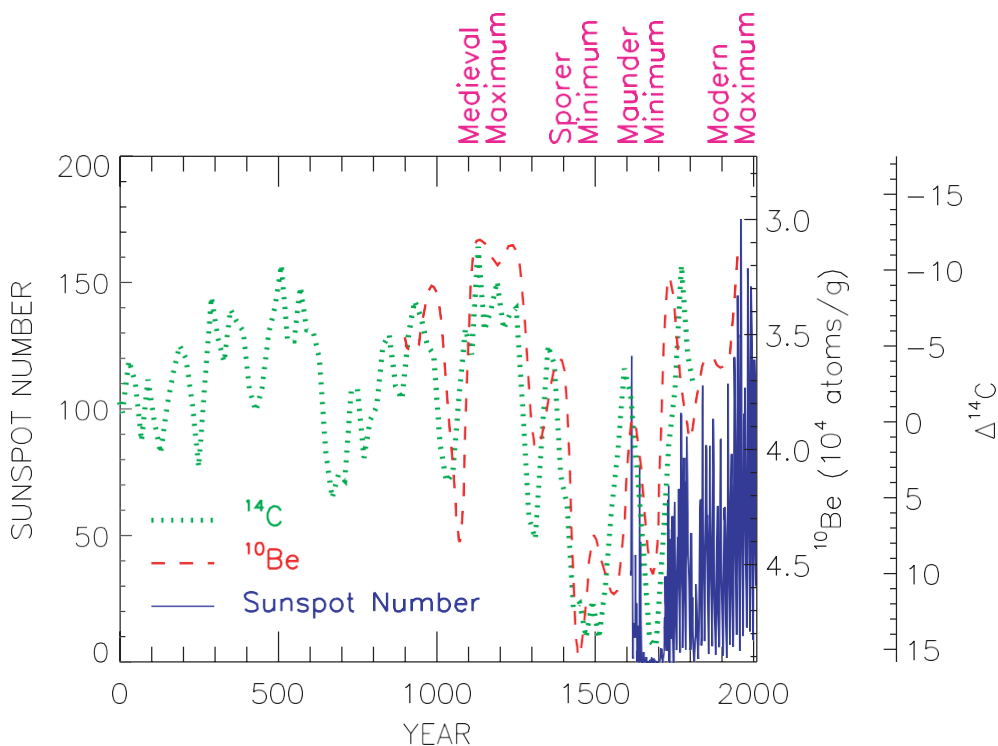
Orbitální změny příchozího slunečního záření

Množství energie, které Země přijímá od Slunce, se mění v mnoha různých časových intervalech. V posledních dvou tisíciletích ovlivňovaly množství sluneční energie, které dosáhlo vrcholu zemské atmosféry, především dva mechanismy. První mechanismus souvisí se změnami orbitálních parametrů Země způsobenými gravitační přitažlivostí Slunce, Měsíce a ostatních planet. Tyto vlivy společně mění sklon zemské osy rotace, excentricitu zemské dráhy a orientaci excentrické dráhy vzhledem k jarní rovnodennosti, a to v časovém rozmezí od 20 000 do 400 000 let (Berger 1978). Během omezeného období posledních 2 000 let vedly změny dráhy Země k malým změnám v množství slunečního záření přicházejícího na vrchol zemské atmosféry podle zeměpisné šířky a ročního období. Tyto orbitální vlivy by měly mít za následek pouze malý trend v sezónních teplotách povrchu za posledních 2 000 let, takže léta na severní polokouli jsou dnes o něco chladnější a zimy na severní polokouli o něco teplejší než před 2 000 lety. Vzhledem k sezónní povaze těchto vlivů zůstala příchozí průměrná roční sluneční radiace v podstatě nezměněna.

Variabilita slunečního záření

Emise slunečního záření se také mění v závislosti na četnosti výskytu tmavých slunečních skvrn, jasných faset a dalších slunečních jevů. Odhady *celkového slunečního záření* za poslední dvě tisíciletí pocházejí z několika měření. Přímá měření kosmickými radiometry, která jsou k dispozici od roku 1978, ukazují, že celková intenzita záření se během posledních dvou jedenáctiletých slunečních cyklů změnila jen asi o 0,1 % (Fröhlich a Lean 2004). Tato přímá měření ukázala dobrou korelaci počtu slunečních skvrn a intenzity ozáření během cyklů 21 a 22. V posledním cyklu je ozáření stejně vysoká jako během posledních dvou cyklů, ale počet slunečních skvrn je o 20-30 % nižší (Fröhlich a Lean 2004, Lean 2005b).

Jako zástupné ukazatele celkového slunečního záření za poslední dvě tisíciletí byly navrženy různé sluneční ukazatele, jako je počet slunečních skvrn, délka slunečního cyklu a kosmogenní izotopy uhlíku a berylia (obr. 10-2). Vizuální záznamy slunečních skvrn pomocí dalekohledů jsou k dispozici od roku 1610, ale jak bylo uvedeno výše, korelace slunečních skvrn s ozářením nebyla v posledních třech cyklech stejná. Měření izotopů berylia v ledových jádrech a izotopů uhlíku v letokruzích stromů jsou k dispozici za posledních 1 000 až 2 000 let. Produkce těchto izotopů je z



OBRÁZEK 10-2 Záznamy počtu slunečních skvrn a kolísání kosmogenních izotopů v letokruzích stromů a ledových jádrech v souvislosti se sluneční aktivitou za posledních 2000 let. ZDROJ: Aktualizováno podle Fröhlich a Lean (2004). Přetištěno se svolením; copyright 2004.

galaktické kosmické záření, které je v době silné sluneční aktivity vytlačováno slunečním větrem od Země. Vztah mezi ozářením a kosmogenními izotopy je však složitý a nemusí být nutně lineární (Wang et al. 2005b).

Proxy záznamy slunečního záření byly použity, často v kombinaci s nedávnými satelitními měřeními a experimenty modelování slunečního záření, k získání rekonstrukce celkového slunečního záření za poslední dvě tisíciletí. První rekonstrukce přijaly dlouhodobý trend slunečního ozáření založený na záznamech kosmogenních izotopů a porovnání se Slunci podobnými hvězdami, což vedlo k odhadu slunečního ozáření pro Maunderovo minimum (1645-1715) přibližně o 0,2-0,4 % nižšího než současné sluneční minimum (Hoyt a Schatten 1993, Lean et al. 1995). Mechanismy navržené k vysvětlení tohoto trendu byly v poslední době zpochybněny a novější rekonstrukce předpokládají, že sluneční výkon během Maunderova minima se blížil výkonu současných slunečních minim (Foukal et al. 2004). Nejnovější rekonstrukce (Fröhlich a Lean 2004, Wang et al. 2005a) ukazují, že sluneční záření se za posledních 2 000 let měnilo přibližně o 0,1 %, což odpovídá změnám v radiačním působení o 0,1-0,2 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ mezi obdobími nízké a vysoké sluneční aktivity (obr. 10-2). Prodloužené intervaly nízké

sluneční aktivity, vyznačující se absencí slunečních skvrn, patří období od roku 1645 do roku 1715 (Maunderovo minimum) a od roku 1450 do roku 1550 (Sporerovo minimum). Tato sluneční minima nastala v rámci malé doby ledové (která trvala přibližně od roku 1500 do roku 1850). Některé studie naznačují, že sluneční aktivita ve středověku mohla být srovnatelná s moderním slunečním maximem. Ve všech těchto záznamech existují značné nejistoty z důvodu krátkosti kalibračních záznamů a našeho neúplného fyzikálního chápání sluneční aktivity a jejího vlivu na ozáření. Navíc nepřímé vlivy spojené se změnami ozonu a stratosféry mohou měnit atmo- sférickou cirkulaci a odezvu (Shindell et al. 2001).

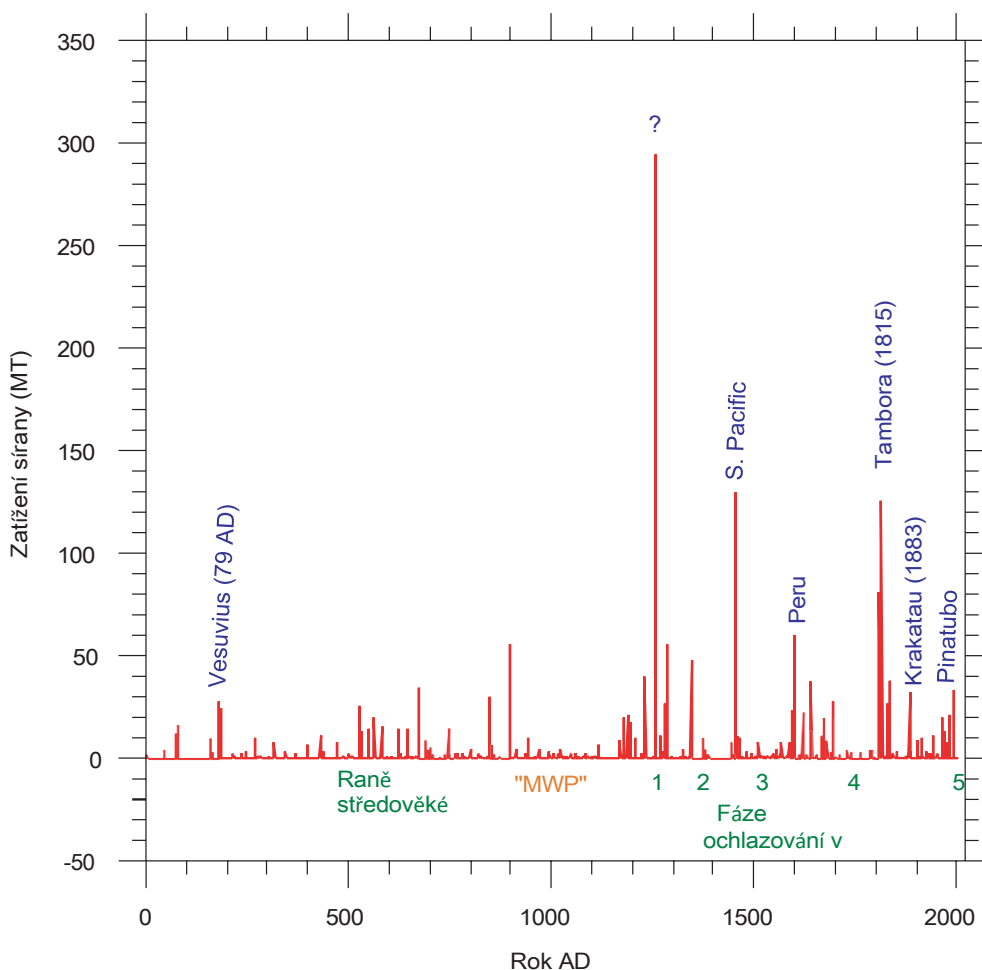
Sopečné erupce

Radiační účinek sopečné erupce závisí na jejím rozsahu a místě, ročním období, vertikální orientaci erupce a na typu a velikosti výtrysků (Robock 2000). Explosivní sopečné erupce dodávají do atmosféry velké množství popela a sirných plynů, které snižují množství slunečního záření dopadajícího na povrch, a tím ochlazují Zemi. Větší částice popela se rychle usazují na povrchu a zpravidla ochlazují povrchovou teplotu pouze v malé oblasti po dobu několika dnů až několika týdnů. Sirné plyny se spojují s vodní párou a vytvářejí sulfátové aerosoly. Při velkých explozivních erupcích se menší síranové aerosoly dostávají vysoko do atmosféry, kde zůstávají až několik let. Síranové aerosoly z tropických erupcí jsou globálně přenášeny vysokohorskými větry, zatímco síranové aerosoly z erupcí ve vysokých zeměpisných šířkách jsou prostorově omezenější a mají menší vliv na globální teplotu. Přestože velké erupce mohou vést k výraznému ochlazení bezprostředně po erupci, jako například "rok bez léta" po erupci hory Tambora v Indonésii v roce 1815, tento účinek je izolovaný na několik let. Akumulace sulfátových aerosolů z několika sopek, které jsou od sebe časově blízko, může vést k většímu globálnímu ochlazení.

Satelitní přístroje poskytly měření aerosolu při velké erupci hory Pinatubo v roce 1991 na Filipínách. Historické záznamy byly použity k dokumentaci minulých velkých erupcí v obydlených oblastech, zejména Tambory v roce 1815 a Krakatau v roce 1883. Ještě dále v minulosti zaznamenala polární ledová jádra v Grónsku a Antarktidě kyselost a sírany v ročních vrstvách ledu z usazování sopečných síranových aerosolů (Crowley 2000, Hegerl 2006). Rozklíčování, zda se jednalo o sopečné úlomky z blízké sopky ve vysokých zeměpisných šířkách nebo z velké tropické sopky, vyžaduje použití záznamů z více ledových jader umístěných na obou pólech a je citlivé na to, která ledová jádra jsou použita. Rekonstrukce sopečné činnosti v posledních dvou tisíciletích všechny rozlišují velké erupce v letech 1258 nebo 1259, 1453 a 1815 spolu s obdobími aktivnějšího vulkanismu na konci 13. století, v 17. století a na počátku 19. století, i když se různé rekonstrukce liší v některých detailech (obr. 10-3).

Využití půdy

Přestože člověk mění přirozenou vegetaci již tisíce let mýcením lesů a vysazováním plodin (Ruddiman 2003), k největším regionálním změnám v kontinentálním vegetačním krytu došlo od poloviny 19. století na severní polokouli a od počátku 20. století na jižní polokouli (Bertrand et al. 2002). Změna půdního pokryvu ovlivňuje klima tím, že mění odrazivost zemského povrchu.



OBRÁZEK 10-3 Odhady globálního zatížení stratosféry sírany ze sopek v ledových jádrech (1 - 2005 n. l.). ZDROJ: T. Crowley, Duke University, 2006, nepublikovaný materiál. Přetištěno se svolením; copyright 2006.

a hydrologický cyklus. V současné době jsou odhady změny teploty v důsledku změny využívání půdy závislé na modelu a souboru dat a nelze je nezávisle ověřit pomocí proxy dat. Jedna studie odhaduje globální ochlazení až o 0,4 °C za posledních 1 000 let (Bauer et al. 2003). Jiná naznačuje výrazné regionální oteplení ve 20. století (Christy et al. 2006).

Kromě těchto přímých radiačních účinků mohou změny půdního pokryvu ovlivnit zdroje a propady skleníkových plynů a množství prachu, které vítr zvedá do atmosféry. Například koncentrace oxidu uhličitého v atmosféře se zvyšují kácením lesů a snižují zalesňováním, koncentrace metanu se zvyšují kácením lesů a snižují zalesňováním.

a koncentrace oxidu dusného se zvyšují při pěstování rýže a při používání dusíkatých hnojiv při zemědělské činnosti.

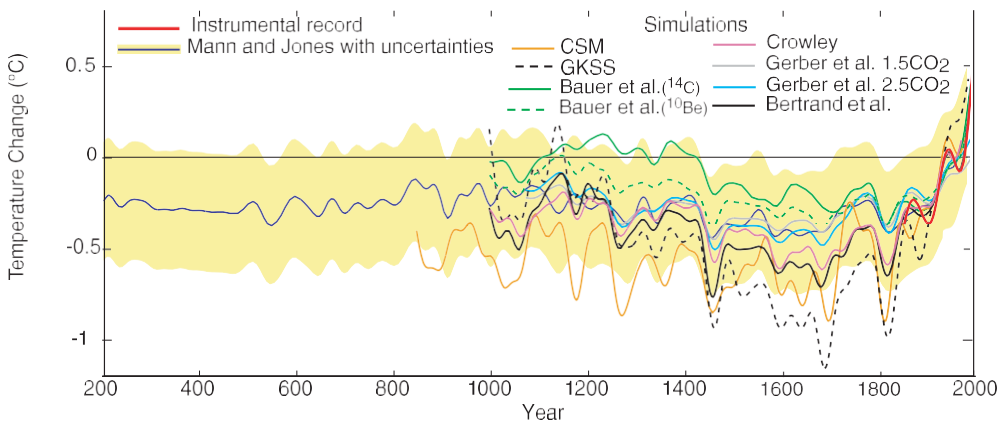
Troposférické aerosoly

Přirozené koncentrace troposférických aerosolů zůstaly před průmyslovým obdobím relativně konstantní. V průběhu 20. století se koncentrace v důsledku lidské činnosti zvýšily (Ramaswamy et al. 2001). Radiační působení troposférických aerosolů má velké rozmezí spojené s nejistotami ve zdrojích, složení a vlastnostech aerosolů a jejich interakcí s mraky (NRC 2005). Pozorování a modely naznačují, že celkově přímý účinek aerosolů a nepřímý účinek spojený s interakcemi aerosolů s mraky pravděpodobně vede ke snížení slunečního zářivého toku na zemském povrchu, ačkoli jednotlivé druhy aerosolů, jako je černý uhlík, mohou mít pozitivní zářivý účinek (Ramaswamy et al. 2001). Troposférické aerosoly přetrvávají v atmosféře několik dní až týdnů a mají značné regionální rozdíly; nejistoty v jejich účincích jsou velké, zejména v menších prostorových měřítkách (NRC 2005).

SIMULACE KLIMATICKÝCH MODELŮ

Počítačové modely lze použít k simulaci chování klimatického systému s ohledem na časovou i geografickou proměnlivost, aby bylo možné pochopit jak přirozenou proměnlivost klimatického systému, tak reakci klimatického systému na změny klimatických faktorů (NRC 2001). Tyto simulace mohou být také použity k inter-pretaci rekonstrukcí klimatu na základě proxy (Trenberth a Otto-Bliesner 2003). K simulaci proměnlivosti klimatu za posledních 1 000 let byla použita hierarchie modelů. Tyto modely sahají od jednodušších modelů energetické bilance až po mnohem podrobnější a počítačově náročnější modely zemského systému. Klimatické modely byly použity k testování různých aspektů rekonstrukcí povrchových teplot. Kromě toho mohou být použity k odhadu citlivosti povrchové teploty a dalších klimatických proměnných na odhadované klimatické vlivy v tomto období a nejistoty spojené s těmito odhady. Na základě modelových simulací s několika teplotními rekonstrukcemi a instrumentálními údaji za posledních sedm století a se zohledněním nejistot v rekonstrukcích a silových faktorech uvádí Hegerl et al. (2006) odhad citlivosti klimatu 1,5-6,2 °C.

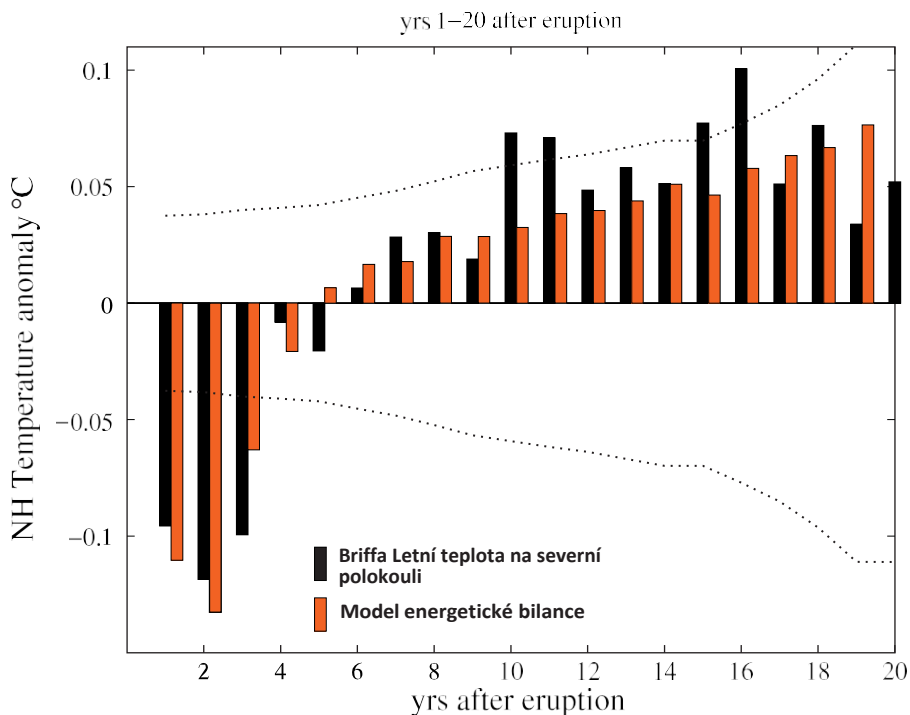
Simulace klimatu za posledních 1 000 let byly provedeny pomocí různých modelů (Jones a Mann 2004b a odkazy tamtéž). Tyto simulace obecně ukazují, že povrchové teploty na severní polokouli byly před 20. stoletím chladnější než v referenčním období 1961-1990, přičemž druhá polovina 20. století byla teplejší než kterákoli část předchozího tisíciletí (obr. 10-4). Simulované povrchové teploty na severní polokouli klesají od roku 1000 n. l. až k rozsáhlému minimu v letech 1500 až 1700 a po roce 1900 se výrazně oteplují. V simulovaných povrchových teplotách je patrné ochlazení spojené se sopkami. Průměrná odezva klimatického modelu na sopečné vlivy vykazuje eskládání doby ochlazení v souladu s dobou odvozenou z rozsáhlých rekonstrukcí letních povrchových teplot severní polokoule založených na stromových prstencích a multiproxy (Hegerl et al. 2003; obr. 10-5). Modelové simulace jsou v souladu s publikovanými rekonstrukcemi povrchové teploty.



OBRÁZEK 10-4 Odhady kolísání teploty povrchu severní polokoule za poslední dvě tisíciletí. Zobrazeny jsou 40leté vyhlazené řady. Modely byly vyrovnány tak, aby měly ve společném období 1856-1980 stejný průměr jako instrumentální řady (kterým je v referenčním období 1961-1990 přiřazen nulový průměr). Modelové simulace jsou založeny na různých historiích radiačního působení a využívají hierarchii modelů. ZDROJ: Jones a Mann (2004b). Reprodukováno se svolením Americké geofyzikální unie; copyright 2004.

Rozdíly mezi modelovými simulacemi posledního tisíciletí souvisejí s několika faktory. Rekonstrukce vulkanických a slunečních vlivů, které modely používají, se liší stejně jako jejich geografické a sezónní provedení. Většina dosud publikovaných simulací klimatických modelů používala jednu z dřívějších rekonstrukcí slunečního záření, která zahrnovala nárůst slunečního záření od Maunderova minima do současnosti o přibližně 0,2-0,4 %. Žádná z dlouhých přechodových simulací nezahrnovala změny slunečního ozáření v závislosti na délce vlny, ačkoli tento efekt byl zkoumán u kratších simulací citlivosti a ukázalo se, že ovlivňuje regionální klima na povrchu (Shindell et al. 2001). Vulkanické rekonstrukce použité v různých simulacích klimatických modelů ukazují podobné načasování velkých sopečných erupcí a časové shluky erupcí. Modely se liší v přepočtu sopečného sulfátového zatížení na optickou hloubku a v sezónně závislém horizontálním a vertikálním rozptylu aerosolového oblaku. Modely se rovněž liší, pokud jde o specifika výpočtů přenosu záření zahrnutých pro sopečné aerosoly. Například v některých modelech energetické bilance a modelech střední složitosti jsou sopky reprezentovány jako záporná odchylka slunečního záření.

Rozdíly mezi jednotlivými modelovými simulacemi mohou souviset také s rozdílnou citlivostí modelů (Goosse et al. 2005). Dva z modelů, CSM a GKSS, jsou plně trojrozměrné klimatické modely a jejich rovnovážná citlivost klimatu je 2 °C, resp. 3,2 °C pro zdvojnásobení atmosférického CO₂. Některé jednodušší modely mají nastavitelnou citlivost klimatu (tj. simulace Gerber 1,5 × CO₂ a 2,5 × CO₂). Různé modely také vykazují různou citlivost na různé vnější vlivy. Úplně trojrozměrné klimatické modely, které zahrnují parametrizaci distribuce velikosti a přenosu vulkanických aerosolů, vykazují

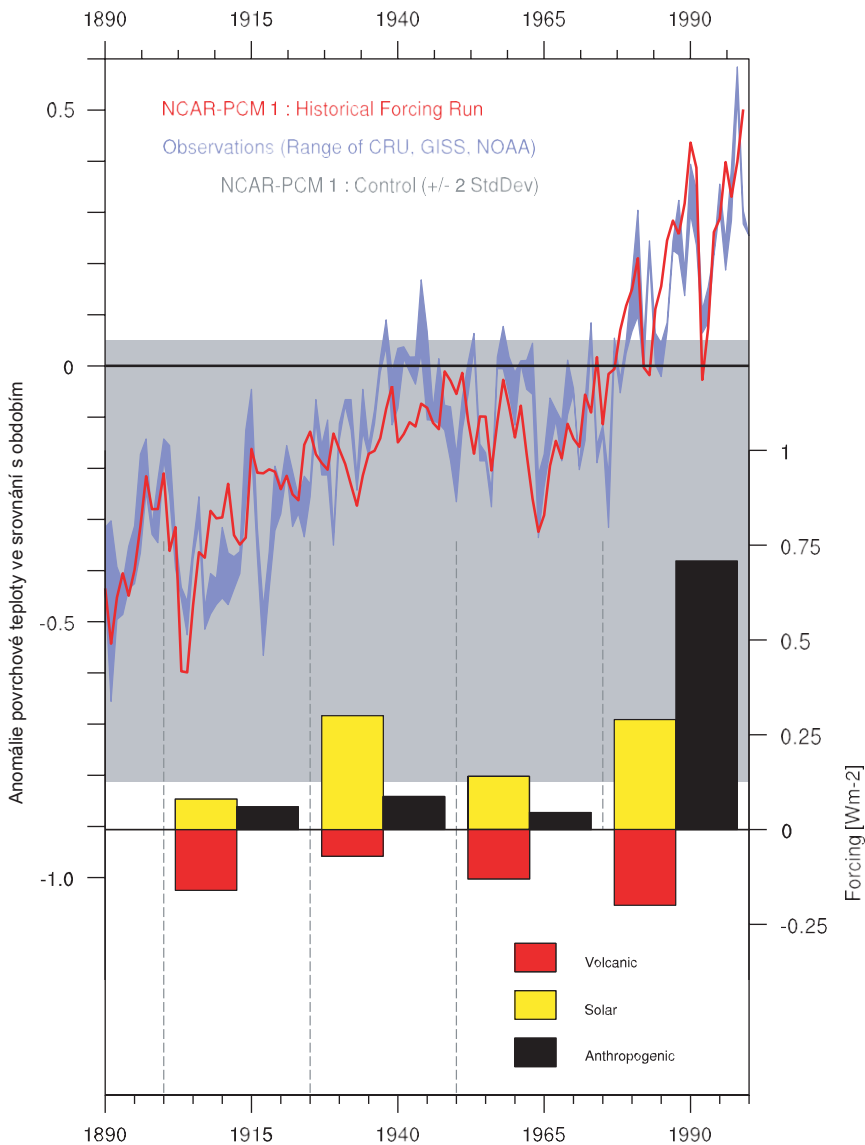


OBRÁZEK 10-5 Srovnání průměrné odezvy na sopečné erupce v modelu energetické bilance a rekonstrukce Briffa et al. (2001) pro rok erupce (rok 1) do další velké erupce. Tečkované čáry představují 9-95% rozsah nejistot pro pozorovanou odezvu (všimněte si, že velikost vzorku s časem klesá). ZDROJ: Hegerl et al. (2003). Reprodukováno se souhlasem American Geophysical Union; copyright 2003.

silnější ochlazení než modely, které předepisují vulkanické vlivy ve smyslu snížení slunečního záření.

ANTROPOGENNÍ VLIVY A NEDÁVNÉ ZMĚNY KLIMATU.

Podle současných odhadů byly změny přirozených klimatických vlivů za posledních 2 000 let mnohem menší než nárůst současných skleníkových vlivů způsobených lidskou činností. Během 27 let, kdy bylo sledováno pomocí satelitních přístrojů, se sluneční záření měnilo pouze o $0,1-0,2 \text{ W-m}^{-2}$ (Foukal et al. 2004). Sopečná činnost nebyla ve srovnání s posledními 1 000 lety anomální a nelze ji použít k vysvětlení oteplení na konci 20. století. Koncentrace skleníkových plynů v atmosféře se během 20. století výrazně zvýšila a je znatelně vyšší než předindustriální úroveň. Radiační síla způsobená nárůstem dlouhodobých skleníkových plynů od roku 1750 do roku 2000 činí přibližně $2,5 \text{ W-m}^{-2}$ (Ramaswamy et al. 2001). Troposférické aerosoly a využití půdy se v důsledku lidské činnosti rovněž změnily, ale velikost těchto silných vlivů není tak dobře známa.



OBRÁZEK 10-6 Modelové odhady globální povrchové teploty (modrá čára) ve srovnání s odhady z pozorování (červená čára) s příspěvky přírodních a antropogenních vlivů pro 25letá období znázorněné barevnými pruhy. ZDROJ: Ammann et al. (2003). Reprodukováno s povolením Americké geofyzikální unie; copyright 2003.

(Ramaswamy et al. 2001, NRC 2005). Výsledky využívající přístup Monte Carlo, simulace klimatických modelů a pozorování oteplování atmosféry a oceánů naznačují, že celkové radiační působení od předindustriální doby do současnosti činí $1,4\text{--}2,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, což je v souladu s pozorovaným oteplením (Knutti et al. 2002).

Simulace pomocí modelů energetické bilance a modelů střední složitosti ukazují, že kombinace slunečních a vulkanických vlivů může vysvětlit období relativního tepla a chladu mezi lety 1000 a 1900 n. l., ale k reprodukci oteplení na konci 20. století je zapotřebí antropogenních vlivů, zejména zvýšení množství skleníkových plynů (Crowley 2000, Bertrand et al. 2002, Bauer et al. 2003). K simulaci relativní role přirozených a člověkem způsobených klimatických faktorů při vysvětlování změn globální povrchové teploty ve 20. století, které byly zkonstruovány na základě přístrojových záznamů, byly použity spojené modely atmosféry a oceánu (Stott et al. 2000, Ammann et al. 2003) (obr. 10-6). Přestože různé modelové simulace používají různé specifikace různých přírodních a antropogenních sil a různé parametrizace, simulace se shodují v tom, že antropogenní síly mají největší podíl na oteplení koncem 20. století.

Současné klimatické modely byly vyladěny tak, aby optimalizovaly svou schopnost simulovat současné klima, a vykazují řadu klimatických citlivostí spojených s různým zpracováním procesů, jako jsou procesy spojené s mraky a sněhem a ledem (Webb et al. 2006, Winton 2006). Některé modely byly porovnávány s údaji pro minulá časová období, která zahrnují významné změny ve vlivech a reakcích klimatu, například poslední interglaciaci (Kaspar et al. 2005, Otto-Bliesner et al. 2006a) a poslední glaciální maximum (Masson-Delmotte et al. 2006, Otto-Bliesner et al. 2006b). Skutečnost, že tyto modely simulované klima pro tyto epochy jsou v souladu s proxy důkazy, dodává jejich použití pro přisuzování klimatických změn 20. století a prognózy budoucích klimatických změn důvěryhodnost.

11

Techniky velkoplošné multiproxy rekonstrukce

Využití proxy důkazů ke studiu minulého klimatu nám pomáhá zasadit oteplování ve 20. století do širšího kontextu a také lépe pochopit klimatický systém a zlepšit prognózy budoucího klimatu. Proxy klimatické záznamy popsané v kapitolách 3-8, které byly shromažďovány a zdokonalovány po mnoho desetiletí, byly použity ke zkoumání různých aspektů historie klimatu. Mnohé z těchto studií kombinovaly informace z různých typů proxy, aby využily přednosti jednotlivých proxy a minimalizovaly jejich omezení. Koncem 90. let 20. století začali vědci používat tuto metodiku pro konkrétní účely odhadu kolísání teploty v průběhu posledního tisíciletí, zprůměrovaného ve velkém (globálním a hemisférickém) geografickém měřítku. Tyto velkoplošné rekonstrukce povrchové teploty založené na multiproxy nabízí kvantitativní hodnocení velkoplošných změn povrchové teploty. Obecně se dělí do dvou kategorií: na ty, které kombinují více záznamů stejného typu proxy (např. letokruhy stromů z různých lokalit), a na ty, které kombinují různé typy záznamů (např. letokruhy stromů spolu s listinnými důkazy, záznamy sedimentů atd.). Velkoplošné rekonstrukce povrchové teploty založené na multiproxy technikách mají často časové rozlišení až desítky let nebo jednotlivé roky; umožňují také výzkumníkům odhadnout statistické nejistoty spojené s rekonstrukční technikou, jak je popsáno v kapitole 9. Pro zlepšení prostorového pokrytí zahrnují některé rekonstrukce proxy, které mohou být citlivější na srážky než na teplotu; v takovém případě se k odvození teplotního signálu používají statistické techniky využívající prostorový vztah mezi teplotou a srážkami.

Existují dva obecné přístupy, které se běžně používají k provádění kalibrace, validace a rekonstrukce pro rekonstrukce teploty povrchu ve velkém měřítku. V prvním přístupu se proxy-kalibrace provádí na základě časových řad dominantních vzorců prostorové variability v instrumentálním teplotním záznamu a výsledky se kombinují, aby se získala časová řada velkoplošné průměrné povrchové teploty. Při druhém přístupu jsou jednotlivá proxy data nejprve složena a tato složená řada je poté kalibrována přímo proti časovým řadám velkoplošných teplotních variací.

Počet i kvalita dostupných proxy záznamů pro povrchovou teplotu

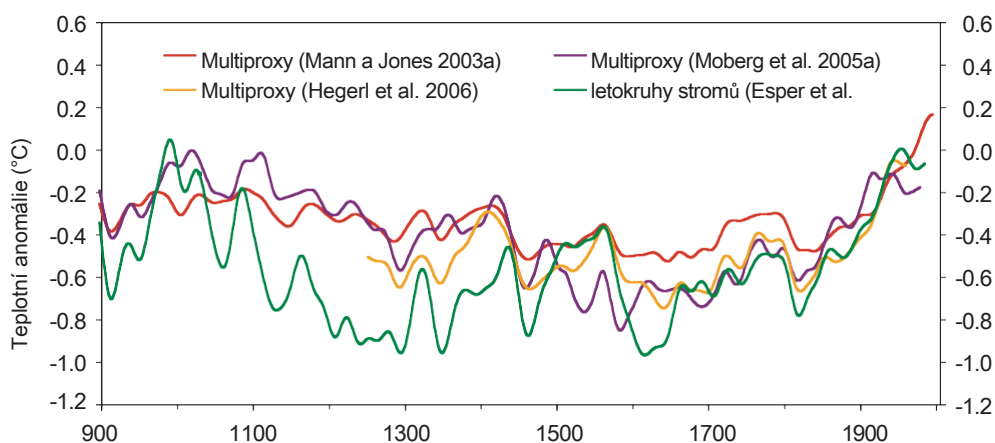
rekonstrukce se dramaticky snižují od století ke století směrem zpět v čase (viz např. obrázek O-2). V současné době sahá méně než 30 ročně rozlišovaných časových řad proxy dat dále než do roku 1000 n. l.; relativně málo z nich je z jižní polokoule a ještě méně z tropů. Přestože pro definování dlouhodobých (např. stoletých) změn průměrné teploty na polokouli je zapotřebí méně lokalit než pro krátkodobé (např. meziroční) změny (viz kapitola 2), hrubý prostorový výběr vzorků omezuje naši důvěru v odhady průměrné teploty na polokouli nebo globální průměrné teploty před rokem 1600 n. l. a velmi ztěžuje vytváření smysluplných kvantitativních odhadů globálních teplotních změn před rokem 900 n. l.. Navíc je instrumentální záznam kratší než některé zajímavé rysy předindustriálního období (tj. delší období sporadického oteplování od roku 800 do roku 1300 a následná malá doba ledová), takže v instrumentálním záznamu je velmi málo statisticky nezávislých informací pro kalibraci a ověření dlouhodobých teplotních rekonstrukcí.

VÝVOJ MULTIPROXY REKONSTRUKČNÍCH TECHNIK

První systematickou, statisticky podloženou syntézu více klimatických ukazatelů provedli v roce 1998 Michael Mann, Raymond Bradley a Malcolm Hughes (Mann et al. 1998); jejich studie se zaměřila na teplotu za posledních 600 let na severní polokouli. Analýza byla později rozšířena na posledních 1 000 let (Mann et al. 1999) a její výsledky byly zahrnuty do zprávy Mezivládního panelu pro změnu klimatu z roku 2001 (IPCC 2001). Později Mann a Jones (2003b) rozšířili multiproxy rekonstrukci dále do minulosti, aby pokryla posledních 1 800 let (viz obr. 10-4). Na základě těchto rekonstrukcí dospěli k závěru, že teploty postupně klesaly z relativního maxima kolem roku 1000 n. l. na minimum kolem roku 1850 a poté prudce rostly po celé 20. století. Grafu znázorňujícímu tento trend, často nazývanému křivka hokejky (reprodukována na obrázku O-4), se dostalo široké pozornosti, protože jej někteří lidé interpretovali jako definitivní důkaz globálního oteplování způsobeného člověkem. Následná debata ve vědecké literatuře pokračuje i v době, kdy jde tato zpráva do tisku (von Storch et al. 2006, Wahl et al. 2006).

Velkoplošné rekonstrukce povrchové teploty provedené Mannem a spol. byly první, které obsahovaly explicitní statistické chybové úsečky, jež naznačují, s jakou důvěrou lze výsledky považovat za správné. V práci Manna a kol. byly chybové úsečky relativně malé přibližně do roku 1600 n. l., ale mnohem větší pro roky 1000-1600 n. l. V práci Manna a kol. byly chybové úsečky poměrně malé. Nižší přesnost v dřívějších dobách je způsobena především omezenou dostupností každoročně rozlišovaných paleoklimatických dat: To znamená, že čím dále do minulosti, tím obtížnější je najít důkazy, které by poskytovaly spolehlivé roční informace. Pro období před rokem 900 n. l. je ročních datových řad velmi málo a data, která nejsou ročně rozlišována, používaná při rekonstrukcích vnášejí další nejistoty.

Od konce 90. let 20. století byla vytvořena řada alternativních rekonstrukcí s využitím různých statistických metod a souborů proxy dat (Esper et al. 2002a,b, 2003; Cook et al. 2004; Moberg et al. 2005b; Rutherford et al. 2005; Hegerl et al. 2006; D'Arrigo et al. 2006; Wahl a Amman v tisku). Obrázek 11-1 ukazuje výsledky několika z těchto snah, z nichž některé jsou podrobněji popsány v následujícím oddíle.



OBRÁZEK 11-1 Čtyři různé velkoplošné rekonstrukce povrchové teploty založené na multiproxy a stromových prstencích, zobrazené pro období 900-2005 n. l. Další informace o jednotlivých datových řadách viz obrázek O-5.

Kritika a pokroky rekonstrukčních technik

Objevily se kritické připomínky k technikám používaným k vytváření velkoplošných rekonstrukcí povrchových teplot, zejména k práci Manna a kol. (např. Zorita a von Storch 2005; McIntyre a McKittrick 2003, 2005a,b; von Storch a kol. 2004; Moberg a kol. 2005b). Jedna z kritik se týká otázky, zda nejsou podhodnoceny změny klimatu mezi stoletími v proxy záznamech, které mají silnou meziroční variabilitu a skládají se z úseků, které byly spojeny dohromady, aby se získala chronologie delší než některý z úseků. Několik výzkumných skupin vyvinulo rekonstrukční metody, které tento problém řeší. Například Esper et al. (2002a) vyvinuli rekonstrukci založenou na stromových letokruzích, která se pokouší odstranit zkreslení pomocí vylepšených statistických metod výslovně navržených tak, aby zachovávaly nízkofrekvenční variabilitu. Moberg et al (2005b) oddělili roční záznamy (letokruhy stromů) od hladších (ne- ročních) záznamů (jako jsou teploty z ledových vrtů a záznamy založené na sedimentech) pomocí waveletové analýzy. Tyto studie naznačují, že skutečná amplituda teplotních změn za posledních 1 000-2 000 let mohla být zhruba dvakrát větší, než se dříve předpokládalo (viz obr. 11-1), i když se jejich výsledky liší v geografickém zaměření a v detailech časové posloupnosti teplotních změn. Von Storch et al. (2004) použili simulaci dlouhodobého klimatického modelu k vytvoření umělých proxy dat a poté porovnali rekonstrukce průměrné teploty na polokouli s různým stupněm šumového znečištění; zjistili, že plná amplituda výkyvů mezi stoletími byla podhodnocena v rostoucí míře s rostoucí úrovní šumu. Rekonstrukce stoletých trendů je tedy značně nejistá, pokud je založena na datech, která vykazují meziroční variabilitu.

Druhá oblast kritiky se zaměřuje na statistickou validitu a robustnost. McIntyre a McKittrick (2003, 2005a,b) zpochybňují výběr a použití statistických metod.

Ods, zejména analýza hlavních komponent, metrika použitá ve validačním kroku rekonstrukce a výběr zástupných ukazatelů, zejména dat o borovici štětinaté použitých v některých původních studiích rekonstrukce teploty. Tyto a další kritické připomínky, stručně rozebrané ve zbývajících částech této kapitoly, vyvolaly obavy, které vedly k novému výzkumu a pokračujícímu úsilí o zlepšení způsobu provádění rekonstrukcí povrchové teploty.

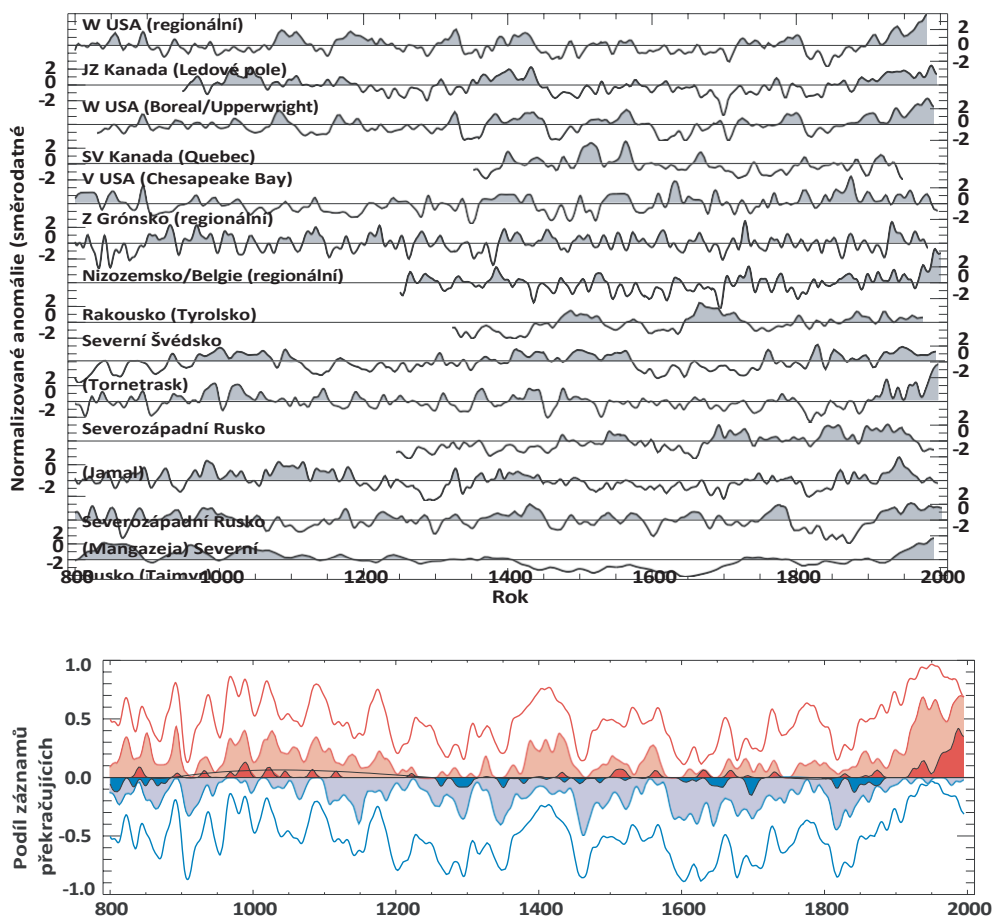
Mann a kol. použili v rámci svých statistických metod typ analýzy hlavních komponent, která má tendenci zkreslovat tvar rekonstrukcí. Popis tohoto efektu je uveden v kapitole 9. V praxi se nezdá, že by tato metoda, ačkoli se nedoporučuje, nepřiměřeně ovlivňovala rekonstrukce průměrné teploty na polokouli; rekonstrukce provedené bez použití analýzy hlavních komponent jsou kvalitativně podobné původním křivkám prezentovaným Mannem et al. (Crowley a Lowery 2000, Huybers 2005, D'Arrigo et al. 2006, Hegerl et al. 2006, Wahl a Ammann v tisku). Důležitějším aspektem této kritiky je otázka robustnosti s ohledem na výběr zástupných ukazatelů použitých při rekonstrukci. Pro období před 16. stoletím je rekonstrukce Manna et al. (1999), která používá tuto konkrétní techniku analýzy hlavních komponent, silně závislá na datech z oblasti Velké pánve na západě Spojených států. Tyto otázky robustnosti je třeba brát v úvahu při odhadech statistických nejistot.

Huybers (2005) a Bürger a Cubasch (2005) upozorňují na další problém, který je třeba v budoucím výzkumu pečlivě zvážit: Při statistické analýze zástupných údajů je třeba učinit mnoho rozhodnutí, která ovlivňují závěry. Huybers (2005) doporučuje, aby se při odhadu prostorových průměrů používaly spíše jednoduché průměry než hlavní komponenty, aby se předešlo nejednoznačnosti. Bürger a Cubasch (2005) používají několik desítek statistických metod k vytvoření příkladů rekonstrukcí; tyto rekonstrukce se podstatně liší, přestože vycházejí ze stejných dat. Mnohé z těchto otázek lze rozhodnout pomocí validačních dat pro výběr mezi konkurenčními modely a zaměřením se na intervaly předpovědi spojené s rekonstrukcí (viz kapitola 9). Při zohlednění intervalů předpovědi lze rozdíly mezi konkurenčními rekonstrukcemi považovat za malé vzhledem k velké nejistotě každého jednotlivého odhadu.

Pokud jde o metriky použité v kroku validace při rekonstrukci, byly vneseny dvě otázky (McIntyre a McKittrick 2003, 2005a,b). Jedním z nich je, že volba "hladiny významnosti" pro validační statistiku snížení chyby (RE) není vhodná. Druhá spočívá v tom, že měly být použity jiné statistiky, konkrétně koeficient účinnosti (CE) a kvadratická korelace (r^2) (různé validační statistiky jsou diskutovány v kapitole 9). Některé z těchto výtek jsou relevantnější než jiné, ale dohromady jsou důležitým aspektem obecnějšího zjištění tohoto výboru, kterým je, že nejistoty publikovaných rekonstrukcí byly podhodnoceny. Metody hodnocení nejistot jsou popsány v kapitole 9.

Několik nedávných výzkumů se zabývalo tím, jak výběr zástupných údajů ovlivňuje rekonstrukce povrchové teploty. Osborn a Briffa (2006) použili alternativní přístup založený na 14 proxy záznamech, z nichž většina sahá až do roku 800 n. l., pocházejících z lokalit rozptýlených po celé severní polokouli. Místo rekonstrukce teplot vybrali proxy záznamy, které dobře korelovaly s místními teploměry za posledních 150 let (bez ohledu na to, zda vykazují oteplování), každý záznam vyhledali a standardizovali tak, aby měl nulový průměr a jednotkovou směrodatnou odchylku, a analyzovali

výkyvy vyhlazených časových řad nad nebo pod zvolené prahové hodnoty (± 1 nebo 2 směrodatné odchylky). Autoři ukázali, že exkurze na teplé straně byly největší ve 20. století a že index odchylek dával grafy podobné těm z jiných výzkumů (obr. 11-2). Metoda Osborna a Briffy přesouvá těžiště sporu od statistických metod používaných k rekonstrukci časových řad teplot k výběru proxy a lokality. Míra prostorové koherence, kterou prokázal Osborn.



OBRÁZEK 11-2 Horní panel: Čtrnáct teplotních proxy záznamů vybraných na základě jejich korelace s instrumentálním záznamem, jak je popsali Osborn a Briffa (2006), filtrovaných tak, aby byly odstraněny odchylky v časovém měřítku kratším než 20 let, a následně normalizovaných tak, aby měly nulový průměr a jednotkovou směrodatnou odchylku v období 800-1995 n. l.. Dolní panel: Podíl záznamů dostupných v každém roce, které mají normalizované hodnoty větší než nula (červená čára), větší než 1 (světle červené stínování), větší než 2 (tmavě červené stínování), menší než nula (modrá čára), menší než -1 (světle modré stínování) a menší než -2 (tmavě modré stínování), přičemž poslední tři řady byly před vykreslením znásobeny -1. ZDROJ: Osborn a Briffa (2006).

a Briffa (2006) spolu s dalšími rekonstrukcemi poskytují podpůrné důkazy pro tvrzení, že oteplení na konci 20. století je prostorově koherentnější než během předchozích teplých období nejméně od roku 900 n. l. (viz také Bradley et al. 2003).

Základním závěrem Manna et al. (1998, 1999) bylo, že oteplení na konci 20. století na severní polokouli nemělo v posledních 1000 letech obdoby. Tento závěr byl následně podpořen řadou důkazů, které zahrnují další velkoplošné rekonstrukce povrchových teplot a doklady o prostorové provázanosti nedávného oteplení popsané výše (Cook et al. 2004, Moberg et al. 2005b, Rutherford et al. 2005, D'Arrigo et al. 2006, Osborn a Briffa 2006, Wahl a Ammann v tisku) a také výrazné změny v řadě místních proxy indikátorů popsané v předchozích kapitolách (např. Thompson et al. v tisku). Na základě analýz uvedených v původních pracích Manna et al. a těchto novějších podpůrných důkazů považuje výbor za pravděpodobné, že severní polokoule byla v posledních několika desetiletích 20. století teplejší než v jakémkoli srovnatelném období v předchozím tisíciletí. Značné nejistoty, které v současnosti panují v kvantitativním hodnocení velkoplošných změn povrchové teploty před rokem 1600 n. l., snižují naši důvěru v tento závěr ve srovnání s vysokou mírou důvěry, kterou přikládáme ochlazení v malé době ledové a oteplení ve 20. století. Ještě menší důvěru lze mít v původní závěry Manna et al. (1999), že "90. léta 20. století jsou pravděpodobně nejteplejším desetiletím a rok 1998 nejteplejším rokem přinejmenším za celé tisíciletí", protože nejistoty spojené s rekonstrukcí teplot pro jednotlivé roky a desetiletí jsou větší než nejistoty pro delší časové úseky a protože ne všechny dostupné proxy údaje zaznamenávají informace o teplotě v tak krátkém časovém horizontu. Používané metody se však vyvíjejí a očekává se, že se budou zlepšovat.

SILNÉ STRÁNKY A OMEZENÍ VELKOPLOŠNÝCH REKONSTRUKČÍ PVRCHOVÉ TEPLoty.

Výbor určil následující hlavní přednosti rekonstrukcí povrchových teplot ve velkém měřítku:

- Velkoplošné rekonstrukce povrchové teploty jsou založeny na proxy záznamech, které jsou významnými záznamníky proměnných prostředí. Souvislosti mezi proxy záznamy a environmentálními proměnnými jsou dobře zdůvodněny z hlediska fyzikálních, chemických a biologických procesů.
- Stromové letokruhy, které jsou dominantním zdrojem dat v mnoha rekonstrukcích, pocházejí z regionálních sítí s rozsáhlou replikací a jsou dobrým indikátorem proměnných prostředí v regionálním měřítku. Regionální řady letokruhů stromů jsou vysoce korelovány s měřeními teploty a sucha. Tyto souvislosti mají přesvědčivý biofyzikální základ související s fyziologií stromů a klimatem ve vegetačním období. V některých prostředích dominuje teplota a v jiných srážky, což je v souladu s ekologickými očekáváními ohledně limitů růstu (Fritts 1976).
- Z různých rekonstrukcí vyplývají stejné obecné teplotní trendy. Některé rekonstrukce se zaměřují na stromy závislé na teplotě a používají měření hustoty dřeva (Briffa et al. 2002), jiné se zaměřují na stromy závislé na teplotě a používají šířku letokruhů (D'Arrigo et al. 2006) a další zahrnují rozsáhlá data ze stromů závislých na srážkách a ledových jader a používají korelace klimatických polí k odvození

(Rutherford et al. 2005). Jedna z rekonstrukcí vůbec nepoužívá pro změny ve stoletém a delším měřítku síť letokruhů stromů, ale spoléhá na kombinaci geochemických a sedimentárních proxy (Moberg et al. 2005b).

- Záznamy teplot od roku 1600 do současnosti získané na základě velkoplošných rekonstrukcí povrchových teplot jsou v souladu s dalšími zdroji teplotních informací pro toto období, včetně teplot z vrtů a záznamů délky ledovců.

- Před rokem 1600 je informací méně a průběh změn není nutně synchronní, ale období středověkého oteplení lze pozorovat v řadě různých záznamů, včetně historických informací z Evropy a Asie, jeskynních usazenin, mořských a jezerních sedimentů a ledových jader z Grónska, Ellesmerova ostrova, Tibetu a rovníkových And.

S pokračujícím výzkumem zůstává mnoho výzev, jak využít rekonstrukce povrchových teplot ve velkém měřítku k poznání historie klimatu (Hughes 2002, Rutherford et al. 2005, D'Arrigo et al. 2006). Existují dvě hlavní strukturální výzvy. Za prvé, množství vysoce kvalitních proxy dat dostupných pro analýzu se výrazně snižuje s postupem do minulosti. Například velké bohatství údajů o síti letokruhů stromů dostupných pro rok 1700 se do roku 1000 n. l. do značné míry vyčerpá. Na rozsáhlé teplotní rekonstrukce je třeba vždy pohlížet tak, že mají "nejasné" rané období a pozdější období relativní jasnosti. Hranice mezi nejasností a jasností není přesná, ale nominálně se pohybuje kolem roku 1600. Za druhé, omezená délka (asi 150 let) teplotního záznamu, který je k dispozici pro kalibraci velkoplošných teplotních odhadů, omezuje snahu o prokázání přesnosti teplotních rekonstrukcí. Další výzkum by měl být zaměřen na nezávislé kontroly rekonstrukcí pomocí teplot z vrtů, záznamů délky ledovců a dalších zástupných ukazatelů. Úloha statistických metod není triviální. Každá jednotlivá proxy poskytuje záznam o změnách prostředí, ale proces kombinace těchto environmentálních signálů do velkoplošného prostorového průměru teploty vyžaduje statistické vyhodnocení. I když je jednotlivá proxy dokonale zaznamenávající lokální prostředí, zůstává otázkou, zda lokální prostředí adekvátně nebo reprezentativně vzorkují teplotní pole ve velkém měřítku. Kromě toho většina proxy záznamů postrádá roční chronologickou přesnost, jaká se vyskytuje u údajů o letokruzích stromů; typická chyba datování může činit 1-5 % stáří vzorku u ročně vrstvených záznamů, jako jsou jezerní varvy a 5-10 % u radiometricky datovaných záznamů za posledních 2 000 let.

Výbor identifikoval následující omezení velkoplošných rekonstrukcí povrchových teplot, která by bylo vhodné dále zkoumat:

- Při ověřování rekonstruované teploty v průměru za desetiletí a delší období existuje jen velmi málo stupňů volnosti. Metrika validace RE, kterou použili Mann et al. (1998, 1999), je minimálním požadavkem, ale výbor si klade otázku, zda může jakákoliv jednotlivá statistika poskytnout konečný údaj o nejistotě, která je rekonstrukci vlastní. Prokázání výkonnosti pro složku s vyšší frekvencí (např. výpočtem statistiky CE) by zvýšilo důvěru, ale stále by plně neřešilo otázku hodnocení schopnosti rekonstrukce zachytit změny teploty v časovém měřítku od desetiletí do sta let.

- Využití zástupných ukazatelů citlivých na hydrologické proměnné (včetně stromů citlivých na vlhkost a izotopů v tropických ledových jádrech a speleotémech) k využití pozorovaných jevů.

korelace s povrchovou teplotou by mohla vést k problémům a měla by být prováděna pouze v případě, že vztah mezi proxy a teplotou má klimatologické opodstatnění.

- Pozorovaný rozpor mezi některými proměnnými z letokruhů stromů, které jsou považovány za citlivé na teplotu, a teplotními změnami pozorovanými na konci 20. století (Jacoby a D'Arrigo 1995, Briffa et al. 1998) snižuje důvěru v to, že korelace mezi těmito proměnnými a teplotou byla v průběhu času konzistentní. Do budoucna je třeba pochopit příčinu této "divergence", která je prozatím považována za jedinečnou pro 20. století a pro oblasti severně od 55° s. š. (Cook et al. 2004).

- V případě chronologií letokruhů stromů proces odstraňování biologických trendů z údajů o šířce letokruhů potenciálně zastírá informace o dlouhodobých změnách klimatu.

- Rekonstrukce teploty pro období před rokem 1600 n. l. jsou založeny na proxy datech z omezeného počtu geografických oblastí a některé rekonstrukce nejsou robustní s ohledem na odstranění proxy záznamů z jednotlivých oblastí (viz např. Wahl a Ammann v tisku). Vzhledem k omezenému množství dat jsou někdy různé rozsáhlé rekonstrukce založeny na stejných souborech dat, a proto je nelze považovat za zcela nezávislé.

- Rekonstrukce nízkofrekvenčních změn v teplotním záznamu, které využívají jiných zástupných ukazatelů než letokruhy stromů (Moberg et al. 2005b), jsou omezeny malým počtem dostupných záznamů, nejistotou datování a citlivostí mnoha zástupných ukazatelů na hydrologické proměnné i na teplotu. Tyto mezery v údajích zdůrazňují potřebu pokračovat v koordinovaném úsilí o sběr proxy údajů v rozsáhlých zeměpisných oblastech.

Pokud jde konkrétně o rekonstruovanou variabilitu teplot v krátkých časových obdobích (od roku do desetiletí), výbor označil následující omezení, která by bylo vhodné dále zkoumat:

- Velkoplošné rekonstrukce povrchové teploty vykazují velmi omezené statistické dovednosti (např. pomocí statistiky CE) pro soubory proxy před 19. stoletím (Ruth-erford et al. 2005, Wahl a Ammann v tisku). Publikované informace, i když omezené, také naznačují, že tyto statistiky jsou citlivé na zahrnutí malých podsouborů dat. Některé z regionálněji zaměřených rekonstrukcí (D'Arrigo et al. 2006) lépe prokázaly dovednosti přibližně do 16. století a možná i dříve. Pro zlepšení dovedností rekonstrukcí je třeba shromáždit více dat a případně vyvinout nové asimilační metody.

- Přesné odvození absolutních hodnot teploty v jednotlivých letech a desetiletích z proxies citlivých na variabilitu v tomto časovém měřítku vyžaduje přesnou rekonstrukci dlouhodobého průměru.

CELKOVÁ ZJIŠTĚNÍ A ZÁVĚRY

Na základě svých úvah a materiálů uvedených v kapitolách 1-11 a v dalších kapitolách dospěl výbor k následujícím obecným závěrům týkajícím se rekonstrukcí velkoplošných povrchových teplot za posledních 2000 let:

- Přístrojově naměřené oteplení o přibližně 0,6 °C během 20. století se odráží také v měření teploty ve vrtech, ústupu ledovců a dalších pozorováních a lze jej simulovat pomocí klimatických modelů.

- Velkoplošné rekonstrukce povrchových teplot poskytují obecně konzistentní obraz teplotních trendů v předchozím tisíciletí, včetně relativně teplých podmínek kolem roku 1000 n. l. (některé označované jako "středověké teplé období") a relativně chladného období (nebo "malé doby ledové") kolem roku 1700. Existenci malé doby ledové zhruba od roku 1500 do roku 1850 potvrzuje celá řada důkazů včetně ledových jader, letokruhů stromů, teplot z vrtů, záznamů o délce ledovců a historických dokumentů. Důkazy o regionálním oteplení ve středověku lze nalézt v rozmanitém, ale omezenějším souboru záznamů, včetně ledových jader, letokruhů stromů, mořských sedimentů a historických pramenů z Evropy a Asie, ale přesné načasování a trvání teplých období se mohlo v jednotlivých regionech lišit a velikost a geografický rozsah oteplení jsou nejisté.

- S vysokou mírou jistoty lze říci, že průměrná globální teplota povrchu byla v posledních několika desetiletích 20. století vyšší než v jakémkoli srovnatelném období v předchozích čtyřech stoletích. Toto tvrzení je odůvodněno konzistencí důkazů z široké škály geograficky různorodých zástupných ukazatelů.

- Méně důvěry lze mít v rekonstrukce povrchových teplot ve velkém měřítku pro období od roku 900 do roku 1600 n. l. V současnosti dostupné proxy důkazy naznačují, že teploty na mnoha, ale ne na všech jednotlivých místech byly v posledních 25 letech vyšší než v jakémkoli srovnatelně dlouhém období od roku 900 n. l.. Nejistoty spojené s rekonstrukcí průměrných teplot na polokouli nebo globálních průměrných teplot na základě těchto údajů se výrazně zvyšují zpětně v čase v tomto období a nejsou dosud plně vyčísleny.

- Výrokům o průměrné teplotě na polokouli nebo globální průměrné teplotě povrchu před rokem 900 n. l. lze přisoudit jen velmi malou jistotu, protože pokrytí daty je řídké a nejistoty spojené s proxy daty a metodami používanými k jejich analýze a kombinaci jsou větší než v novějších časových obdobích.

JAKÉ PŘIPOMÍNKY LZE VZNĚST K HODNOTĚ VÝMĚNY INFORMACÍ A ÚDAJŮ?

Shromažďování, sestavování a kalibrace paleoklimatických dat představuje značnou časovou a finanční investici, na níž se často podílejí velké týmy výzkumníků. Výbor si uvědomuje, že přístup k výzkumným datům je komplikovaná, oborově hluboká záležitost a že přístup k počítačovým modelům a metodám je obzvláště náročný, protože je třeba zohlednit práva duševního vlastnictví. Podle našeho názoru je pro veškerý výzkum přínosem plný a otevřený přístup k publikovaným souborům dat a jasné vysvětlení analytických metod je povinné. Kolegové by měli mít přístup k informacím potřebným k reprodukci publikovaných výsledků, aby se zvýšila důvěra ve výsledek studie uvnitř i vně vědecké komunity. Jiné výbory a organizace vytvořily rozsáhlou literaturu o významu otevřeného přístupu k vědeckým datům a o souvisejících pokynech pro archivaci dat a přístup k nim (např. NRC 1995). Výzkumu paleoklimatu by prospělo, kdyby jednotliví výzkumní pracovníci, odborné společnosti, vydavatelé časopisů a financující agentury nadále zlepšovali své úsilí o zajištění dodržování těchto stávajících postupů otevřeného přístupu.

Výzkumníci kroužků stromů si uvědomují důležitost archivace dat od roku 1974, kdy byla založena Mezinárodní banka dat o kroužcích stromů, která slouží jako trvalé úložiště dat o kroužcích stromů (měření, chronologie a odvozené rekonstrukce). Jejich fondy jsou k dispozici online prostřednictvím Světového datového centra pro paleoklimatol.

stejně jako řada dalších proxy dat z ledových jader, korálů, vrtů, jezerních a oceánských sedimentů, jeskyní a biologických indikátorů. Vzhledem k tomu, že soubory proxy dat jsou stále častěji dostupné na webu, mají všichni výzkumníci možnost analyzovat data, testovat metody a poskytovat vlastní interpretaci existujících důkazů prostřednictvím uznávaných, recenzovaných vědeckých zdrojů.

CO BY SE DALO UDĚLAT PRO LEPŠÍ POCHOPENÍ ZMĚN KLIMATU ZA POSLEDNÍCH 2000 LET?

Rekonstrukce povrchové teploty mají potenciál dále zlepšit naše znalosti o kolísání teploty za posledních 2 000 let, zejména pokud se podaří identifikovat a získat další proxy důkazy. Zvláště cenné by byly další proxy údaje, které zaznamenávají desetileté až stoleté klimatické změny, zejména pro období 1-1600 n. l. V případě, že by se tyto údaje objevily, bylo by možné je využít k rekonstrukci teploty. Nové údaje z jižní polokoule, tropů a oceánů by zvýšily naši důvěru v rekonstrukce globální teploty, zatímco další údaje z oblastí, které již byly vzorkovány, by pomohly snížit nejistoty spojené se současnými rekonstrukcemi. Kromě toho bylo mnoho stávajících proxy záznamů shromážděno před desítkami let a je třeba je aktualizovat, aby bylo možné provádět spolehlivější srovnání s přístrojovými záznamy. Lepší pokrytí daty by také umožnilo testovat, zda změny teplot v minulosti měly stejný průběh jako oteplování v minulém století. Nové metody nebo pečlivější využití stávajících metod mohou také pomoci obejít některá stávající omezení rekonstrukcí povrchových teplot ve velkém měřítku na základě více zástupných ukazatelů. Každá jednotlivá proxy poskytuje záznam o změnách prostředí, ale proces spojování těchto signálů do prostorově zprůměrovaného teplotního signálu vyžaduje pečlivé statistické vyhodnocení. Některá omezení spojená s těmito rekonstrukcemi by bylo možné obejít použitím řady doplňkových strategií při analýze proxy dat, včetně jejich využití k omezení klimatických modelů, a pokusem o kalibraci proxy dat vůči klimatickým proměnným různými způsoby.

Některé z nejdůležitějších důsledků změny klimatu jsou spojeny se změnami srážek, zejména s četností a intenzitou sucha a povodní, a nikoli pouze s teplotou. Zajímavé jsou také změny v regionálních cirkulačních vzorcích, sněžení, hurikánové aktivitě a dalších klimatických prvcích v čase. Proto by bylo cenné vidět regionální i velkoplošné rekonstrukce změn srážek a dalších klimatických proměnných za posledních 2 000 let, které by doplnily rekonstrukce provedené pro teplotu. Úsilí o zlepšení spolehlivosti rekonstrukcí povrchové teploty je třeba doplnit také snahou o lepší pochopení vlivů, které přispěly k proměnlivosti klimatu za posledních 2 000 let. Pokud jsou paleoklimatické rekonstrukce analyzovány ve spojení s historickými a archeologickými důkazy, mohou nám také napovědět, jak se minulé společnosti přizpůsobovaly změnám klimatu.

Odkazy

- ACIA (posouzení dopadů na klima v Arktidě). 2004. *Impacts of a Warming Arctic: Arctic Climate Impact Assessment (Dopady oteplování Arktidy: Hodnocení dopadů na arktické klima)*. Cambridge University Press, Cambridge, Velká Británie.
- Alley, R. 2006. Některé kryosférické poznatky o nedávných změnách klimatu. Powerpointová prezentace pro výbor National Research Council Committee on Surface Temperature Reconstructions for the Past 2,000 Years. March 2, 2006. Washington, DC.
- Alley, R.B. a K.M. Cuffey. 2001. Poměry izotopů kyslíku a vodíku ve srážkách: za hranicemi paleotermometrie. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 43:527-553.
- Ammann, C.M., G.A. Meehl, W.M. Washington a C.S. Zender. 2003. Měsíční a šířkově proměnlivý soubor údajů o vulkanických vlivech v simulacích klimatu 20. století. *Geophysical Research Letters* 30:GL016875. Anchukaitis, K.J., M.N. Evans, A. Kaplan, E.A. Vaganov, M.K. Hughes, H.D. Grissino-Mayer a M.A. Cane. 2006. Forward modeling of regional scale tree-ring patterns in the southeastern United States and the recent vliv letního sucha. *Geophysical Research Letters* 33:L04705.
- Andrews, D.W.K. 1991. Heteroskedasticity and autocorrelation consistent covariance matrix estimation (Odhad kovarianční matice v souladu s heteroskedasticitou a autokorelací). *Econometrica* 59:817-858.
- Aono, Y. a Y. Omoto. 1993. Variace průměrné březnové teploty odvozené z třešňových květů v Kjótu od 14. století. *Journal of Agricultural Meteorology* 48:635-638.
- Arendt, A.A., K.A. Echelmeyer, W.D. Harrison, C.S. Lingle a V.B. Valentine. 2002. Rapid wastage of Alaska glaciers and their contribution to rise of sea level (Rychlé ubývání aljašských ledovců a jejich příspěvek ke zvyšování hladiny moří). *Science* 297:382-386.
- Baillie, M.G.L. a J.R. Pilcher. 1973. A simple cross-dating program for tree-ring research (Jednoduchý program křížového datování pro výzkum letokruhů stromů). *Tree-Ring Bulletin*. 33:7-14.
- Baker, D.G. a D.L. Ruschy. 1993. The recent warming in eastern Minnesota shown by ground temperatures (Nedávné oteplení ve východní Minnesotě podle přízemních teplot). *Geophysical Research Letters* 20:371-374.
- Barber, V.A., G.P. Juday a B.P. Finney. 2000. Redukovaný růst aljašského smrku ztepilého ve dvacátém století v důsledku teplotního stresu způsobeného suchem. *Nature* 405:668-673.
- Bar-Matthews, M., A. Ayalon, M. Gilmour, A. Matthews a C.J. Hawkesworth. 2003. Sea-land oxygen isotopic relationships from planktonic foraminifera and speleothems in the Eastern Mediterranean region and their implication for paleorainfall during interglacial intervals. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 67(17):3181- 3199.
- Bard, E., G. Raisbeck, F. Yiou a J. Jouzel. 2000. Sluneční ozáření za posledních 1200 let na základě kosmických nuklidů. *Tellus B* 52:985-992.
- Barlow, L.K., J.P. Sadler, A.E.J. Ogilvie, P.C. Buckland, T. Amorosi, J.H. Ingimundarson, P. Skidmore, A.J. Dugmore a T.H. McGovern. 1997. Interdisciplinární výzkum severského osídlení západní části Grónska. *Holocene* 7:489-499.

- Barnett, T.P., D.W. Pierce, K.M. AchutaRao, P.J. Gleckler, B.D. Santer, J.M. Gregory a W.M. Washington. 2005. Penetration of human-induced warming into the world's oceans (Pronikání lidmi způsobeného oteplování do světových oceánů). *Science* 309(5732):284-287.
- Bauer, E., M. Claussen, V. Brovkin a A. Huenerbein. 2003. Hodnocení klimatických vlivů na zemský systém za poslední tisíciletí. *Geophysical Research Letters* 30:GL016639.
- Beck, J.W., R.L. Edwards, E. Ito, F.W. Taylor, J. Recy, F. Rougerie, P. Joannot a C. Henin. 1992. Sea-surface temperature from coral skeletal strontium/calcium ratios (Teplota mořské hladiny na základě poměrů stroncia a vápníku v korálovém skeletu). *Science* 257:644-647.
- Berger, A.L. 1978. Dlouhodobé změny kalorické insolace v důsledku orbitálních prvků Země. *Quaternary Research* 9:139-167.
- Berninger, F., P. Hari, E. Nikinmaa, M. Lindholm a J. Meriläinen. 2004. Využití modelované fotosyntézy a rozkladu k popisu růstu stromů na severní hranici lesa. *Tree Physiology* 24:193-204.
- Bertrand, C., M.-F. Loutre, M. Crucifix a A. Berger. 2002. Klima posledního tisíciletí: studie citlivosti. *Tellus A* 54:221-244.
- Berteaux, D., D. Réale, A.G. McAdam a S. Boutin. 2004. Držet krok s rychlou změnou klimatu: může arktický život počítat s evolucí? *Integrative and Comparative Biology* 44(2):140-151.
- Biondi, F. a T.W. Swetnam. 1987. Box-Jenkinsovy modely chronologií letokruhů stromů v interiéru lesa. *Tree-Ring Bulletin* 47:71-95.
- Biondi, F. a K. Waikul. 2004. DENDROCLIM2002: A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computers and Geosciences* 30:303-311.
- Biondi, F., D.E. Myers a C.C. Avery. 1994. Geostatistické modelování velikosti a přírůstu kmene ve starém lese. *Canadian Journal of Forest Research* 24:1354-1368.
- Biondi, F., D.L. Perkins, D.R. Cayan a M.K. Hughes. 1999. July temperature during the second millennium reconstructed from Idaho tree rings. *Geophysical Research Letters* 26:1445-1448.
- Biondi, F., P.C. Hartsough a I. Galindo Estrada. 2005. Denní počasí a růst stromů v tropických oblastech Severní Ameriky. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 37(1):16-24.
- Birks, H.J.B. 1998. Numerické nástroje v paleolimnologii - pokrok, možnosti a problémy. *Journal of Paleolimnology* 20:307-332.
- Black, D.E., L.C. Peterson, J.T. Overpeck, A. Kaplan, M.N. Evans a M. Kashgarian. 1999. Eight centuries of North Atlantic Ocean atmosphere variability. *Science* 286:1709-1713.
- Blunier, T., J. Chappellaz, J. Schwander, J.-M. Barnola, T. Desperets, B. Stauffer a D. Raynaud. 1993. Atmospheric methane, record from a Greenland ice core over the last 1000 years (Atmosférický metan, záznam z grónského ledového jádra za posledních 1000 let). *Journal of Geophysical Research* 20:2219-2222.
- Blunier, T., J. Chappellaz, J. Schwander, B. Stauffer a D. Raynaud. 1995. Variations in atmospheric methane concentration during the Holocene epoch. *Nature* 374:46-49.
- Bond, G., W. Showers, M. Cheseby, R. Lotti, P. Almasi, P. deMenocal, P. Priore, H. Cullen, I. Hajdas a G. Bonani. 1997. Pervasive millennial scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates (Všudypřítomný tisíciletý cyklus v holocénu a glaciálu v severním Atlantiku). *Science* 278:1257-1266.
- Bond, G., B. Kromer, J. Beer, R. Muscheler, M.N. Evans, W. Showers, S. Hoffmann, R. Lotti-Bond, I. Hajdas a G. Bonani. 2001. Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene (Trvalý vliv slunečního záření na severoatlantické klima během holocénu). *Science* 294:2130-2136.
- Box, G.E.P., G.M. Jenkins a G.C. Reinsel. 1994. *Analýza časových řad: Forecasting and Control*. 3. vyd. HoldenDay, San Francisco.
- Bradley, R.S., H.F. Diaz, P.D. Jones a P.M. Kelly. 1988. Secular fluctuations of temperature over Northern Hemisphere land areas and continental China since the mid-19th century (Sekulární kolísání teploty nad pevninskými oblastmi severní polokoule a pevninskou Čínou od poloviny 19. století). In: *The Climate of China and Global Climate. Proceedings of the Beijing International Symposium on Climate, October 30- Nov. 3, 1984, Beijing, China*. Pp. 75-87. D. Ye, C. Fu, J. Chao a M. Yoshino (eds.). China Ocean Press, Peking, a Springer-Verlag, New York.
- Bradley, R.S., M.K. Hughes a H.F. Diaz. 2003. Klima ve středověku. *Science* 302:404-405. Bradshaw, W.E. a C.M. Holzappel. 2006. Klimatické změny: evoluční reakce na rychlé změny klimatu. *Science* 312(5779):1477-1478.
- Bräker, O.U. 2002. Měření a zpracování dat ve výzkumu stromových letokruhů: metodický úvod. *Dendrochronologia* 20:203-216.
- Brázdil, R. 1996. Rekonstrukce minulého klimatu z historických pramenů v českých zemích. In: *Klimatické výkyvy a mechanismy ovlivňující klima v posledních 2000 letech*. NATO ASI series 1, vol. 41. Pp. 409-431. P.D. Jones, R.S. Bradley a J. Jouzel (eds). Springer-Verlag, Berlin.
- Brázdil, R., C. Pfister, H. Wanner, H. Von Storch a Jürg Luterbacher. 2005. Historická klimatologie v Evropě - současný stav. *Climatic Change* 70:363-430.

- Briffa, K.R. a E.R. Cook. 1990. Metody analýzy funkcí odezvy. In *Methods of Dendrochronology*. E.R. Cook a L. Kairiukstis (eds.). Kluwer, Dordrecht, Nizozemsko.
- Briffa, K.R., P.D. Jones, T.S. Bartholin, D. Eckstein, F.H. Schweingruber, W. Karlén, P. Zetterberg a M. Eronen. 1992. Fennoskandinávská léta od roku 500 n. l.: teplotní změny v krátkém a dlouhém časovém měřítku. *Climate Dynamics* 7:111-119.
- Briffa, K.R., F.H. Schweingruber, P.D. Jones, T.J. Osborn, S.G. Shiyatov a E.A. Vaganov. 1998. Reduced sensitivity of recent tree-growth to temperature at high northern latitudes [Zvýšená citlivost recentního růstu stromů na teplotu ve vysokých severních zeměpisných šířkách]. *Nature* 391:678-682.
- Briffa, K.R., T.J. Osborn, F.H. Schweingruber, I.C. Harris, P.D. Jones, S.G. Shiyatov a E.A. Vaganov. 2001. Low-frequency temperature variations from a northern tree ring density network [Nízkofrekvenční změny teploty na základě sítě hustoty letokruhů severních stromů]. *Journal of Geophysical Research* 106(D3):2929-2941.
- Briffa, K.R., T.J. Osborn, F.H. Schweingruber, P.D. Jones, S.G. Shiyatov a E.A. Vaganov. 2002. Údaje o šířce a hustotě letokruhů stromů na severní polokouli: Část 1, místní a regionální klimatické signály. *Holocene* 12:737-757.
- Briffa, K.R., T.J. Osborn a F.H. Schweingruber. 2004. Velkoplošné odvozování teploty z letokruhů stromů: přehled. *Global and Planetary Change* 40:11-26.
- Brohan, P., J.J. Kennedy, I. Harris, S.F.B. Tett a P.D. Jones. V tisku. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new dataset from 1850 (Odhady nejistoty regionálních a globálních pozorovaných změn teploty: nový soubor dat z roku 1850). *Journal of Geophysical Research*.
- Brown, P.J. 1982. Multivariate calibration (s diskusí). *Journal of the Royal Statistical Society B* 44:287-321.
- Buckland, P.C., T. Amorosi, L.K. Barlow, A.J. Dugmore, P.A. Mayewski, T.H. McGovern, A.E.J. Ogilvie, J.P. Sadler a P. Skidmore. 1996. Bioarcheologické a klimatologické důkazy o osudech severských zemědělců ve středověkém Grónsku. *Antiquity* 70:88-96.
- Buckley, B.M., E.R. Cook, M.J. Peterson a M. Barbetti. 1997. A changing temperature response with elevation for *Lagarostrobos franklinii* in Tasmania, Australia [Mění se reakce na teplotu v závislosti na nadmořské výšce u *Lagarostrobos franklinii* v Tasmánii v Austrálii]. *Climatic Change* 36:477-498.
- Bugmann, H.K.M. 1996. Zjednodušený model lesa pro studium druhového složení podél klimatických gradientů. *Ecology* 77:2055-2074.
- Bunn, A.G., R.L. Lawrence, G.J. Bellante, L.A. Waggoner a L.J. Graumlich. 2003. Spatial variation in distribution and growth patterns of old growth strip-bark pines (Prostorová variabilita v rozšíření a růstových modelech starých borovic s kůrou). *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 35:323-330.
- Bunn, A.G., T.J. Sharac a L.J. Graumlich. 2004. Použití simulačního modelu k porovnání metod detrendování letokruhů stromů a ke zkoumání detekovatelnosti nízkofrekvenčních signálů. *Tree-Ring Research* 60(2):77-90.
- Bunn, A.G., L.A. Waggoner a L.J. Graumlich. 2005. Topographic mediation of growth in high elevation foxtail pine (*Pinus balfouriana* Grev. et Balf.) forests in the Sierra Nevada, USA. *Global Ecology and Biogeography* 14:103-114.
- Büntgen, U., J. Esper, D.C. Frank, K. Nicolussi a M. Schmidhalter. 2005. A 1052-year tree-ring proxy for Alpine summer temperatures (1052letá proxy pro letní teploty v Alpách). *Climate Dynamics* 25:141-153.
- Bürger, G. a U. Cubasch. 2005. Jsou multiproxy rekonstrukce klimatu robustní? *Geophysical Research Letters* 32(L23711):1-4.
- Camardi, G. 1999. Charles Lyell a princip uniformity. *Biology and Philosophy* 14:537-560.
- CCSP a SGCR (Vědecký program pro změnu klimatu a Podvýbor pro výzkum globální změny). 2006. Teplotní trendy v nižších vrstvách atmosféry: Kroky k pochopení a vyrovnání rozdílů. Synthesis and Assessment Product 1.1. T. Karl, S. Hassol, C. Miller a W. Murray (eds.). U.S. Department of Commerce, Washington, D.C.
- Chappellaz, J., T. Blunier, S. Kints, A. Dällenbach, J.-M. Barnola, J. Schwander, D. Raynaud a B. Stauffer. 1997. Změny atmosférického gradientu CH_4 mezi Grónskem a Antarktidou během holocénu. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 102(D13):15,987-15,997.
- Charles, C.D., D.E. Hunter a R.G. Fairbanks. 1997. Interakce mezi ENSO a asijským monzunem v korálovém záznamu tropického klimatu. *Science* 277:925-928.
- Charman, D.J., A. Blundell, R.C. Chiverrell, D. Hendon a P.G. Langdon. 2006. Compilation of non-annually resolved Holocene proxy climate records: stacked records of Holocene peatland palaeo-water table reconstructions from northern Britain (Kompilace holocenních proxy klimatických záznamů s jiným než ročním rozlišením: stohované záznamy holocenních rekonstrukcí rašeliníšť z oblasti severní Británie). *Quaternary Science Reviews* 25:336-350.
- Chisholm, T.J. a D.S. Chapman. 1992. Klimatické změny odvozené z analýzy teplot ve vrtech -příklad ze západního Utahu. *Journal of Geophysical Research* 97(B10):14155-14175.
- Christy, J.R., W.B. Norris, K. Redmond a K. Gallo. 2006. Methodology and results of calculating central

California surface temperature trends: evidence of human-induced climate change? *Journal of Climate* 19:548-563.

- Clow, G. 1992. The extent of temporal smearing in surface-temperature histories derived from borehole temperature measurements (Rozsah časového rozmazání v historii povrchových teplot odvozených z měření teploty ve vrtech). *Global and Planetary Change* 6(2-4):81-86.
- Clow, G. a E. Waddington. 1999. Quantification of natural climate variability in central Greenland and East Antarctica using borehole paleothermometry (Kvantifikace přirozené proměnlivosti klimatu ve středním Grónsku a východní Antarktidě pomocí paleotermometrie ve vrtech). *IUGG XXII General Assembly Abstracts*, B.249.
- Cobb, K.M., C.D. Charles, H. Cheng a R.L. Edwards. 2003. El Niño/Southern Oscillation and tropical Pacific climate during the last millennium (El Niño/jižní oscilace a tropické tichomořské klima v posledním tisíciletí). *Nature* 424:271-276.
- Cole, J.E. 2003. Holocénní záznamy o korálech: okna pro proměnlivost tropického klimatu. In: : *Global Change in the Holocene*. Pp. 168-184A. McKay, R. Battarbee, J. Birks a F. Oldfield (eds.). Arnold, London.
- Cole, J.E., R.B. Dunbar, T.R. McClanahan a N.A. Muthiga. 2000. Tropical Pacific forcing of decadal SST variability in the western Indian Ocean over the past two centuries (Vliv tropického Pacifiku na dekadní proměnlivost SST v západní části Indického oceánu v posledních dvou stoletích). *Science* 287:617-619.
- Conkey, L.E. 1986. Red spruce tree-rings widths and densities in eastern North America as indicators of past climate (Šířka a hustota letokruhů červeného smrku ve východní části Severní Ameriky jako indikátory minulého klimatu). *Quaternary Research* 26:232-243.
- Cook, E.R. a L.A. Kairiukstis (eds.). 1990. *Methods of Dendrochronology*. Kluwer, Dordrecht, Nizozemsko.
- Cook, E.R., K.R. Briffa a P.D. Jones. 1994. Spatial regression methods in dendroclimatology: a review and comparison of two techniques [Prostorové regresní metody v dendroklimatologii: přehled a srovnání dvou technik]. *International Journal of Climatology* 14:379-402.
- Cook, E.R., K.R. Briffa, D.M. Meko, D.A. Graybill a G. Funkhouser. 1995. The "segment length curse" in long tree-ring chronology development for palaeoclimatic studies (Prokletí délky segmentu při vývoji chronologie dlouhých stromových letokruhů pro paleoklimatické studie). *Holocene* 5:229-237.
- Cook, E.R., J. Esper a R.D. D'Arrigo. 2004. Extra-tropická proměnlivost teplot na pevnině severní polokoule za posledních 1000 let. *Quaternary Science Reviews* 23:2063-2074.
- Cook, A.J., A.J. Fox, D.G. Vaughan a J.G. Ferrigno. 2005. Ústup ledovcových front na Antarktickém poloostrově za poslední půlstoletí. *Science* 308:541-544.
- Cronin, T.M. 1999. *Principles of Paleoclimatology*. Columbia University Press, New York.
- Cronin, T.M., G.S. Dwyer, T. Kamiya, S. Schwede a D.A. Willard. 2003. Středověké teplé období, malá doba ledová a proměnlivost teplot ve 20. století z Chesapeake Bay. *Global Planetary Change* 36: 17-29.
- Crowley, T.J. 2000. Příčiny klimatických změn za posledních 1000 let. *Science* 289:270-277. Crowley, T.J. a T. Lowery. 2000. Jak teplé bylo středověké teplé období? *Ambio* 29(1):51-54.
- Cuffey, K.M. a G.D. Clow. 1997. Temperature, accumulation and ice sheet elevation in central Greenland through the last deglacial transition. *Journal of Geophysical Research* 102(C12):26,383-26,396.
- Cuffey, K.M., R.B. Alley, P.M. Grootes, J.M. Bolzan a S. Anandakrishnan. 1994. Calibration of the $\Delta^{18}O$ isotopic paleothermometer for central Greenland, using borehole temperatures. *Journal of Glaciology* 40:341-349.
- Cuffey, K.M., G.D. Clow, R.B. Alley, M. Stuiver, E.D. Waddington a R.W. Saltus. 1995. Velká změna teploty v Arktidě na přechodu Wisconsinu a holocénu do glaciálu. *Science* 270:455-458.
- D'Arrigo, R.D., G.C. Jacoby, D.C. Frank, N. Pederson, E.R. Cook, B. Buckley, B. Nachin, R. Mijiddorj a C. Dugarjav. 2001. 1738 let mongolské teplotní variability odvozené z chronologie šířky stromových letokruhů sibiřské borovice. *Geophysical Research Letters* 28:543-546.
- D'Arrigo, R.D., R.J.S. Wilson a G.C. Jacoby. 2006. On the long-term context for late twentieth century warming (K dlouhodobým souvislostem oteplování na konci dvacátého století). *Journal of Geophysical Research* 111:D03103.
- Dahl-Jensen, D., K. Mosegaard, N. Gundestrup, G.D. Clow, S.J. Johnsen, A.W. Hansen a N. Balling. 1998. Minulé teploty přímo z grónského ledového příkrovu. *Science* 282:268-271.
- Dahl-Jensen, D., V. Morgan a A. Elcheikh. 1999. Monte Carlo inverzní modelování teplotního profilu Lawova dómu (Antarktida). *Annals of Glaciology* 29:145-150.
- Daniels, L.D. a T.T. Veblen. 2003. Regionální a lokální vliv disturbancí a klimatu na výškové stromořadí v severní Patagonii. *Journal of Vegetation Science* 14:733-742.
- Dansgaard, W. 1964. Stabilní izotopy ve srážkách. *Tellus* 16:436-447.
- de la Mare, W.K. 1997. Náhlý pokles rozlohy antarktického mořského ledu v polovině 20. století na základě záznamů o lovu velryb. *Nature* 389:87-90.
- Dean, J. 1998. *Understanding Anasazi Culture Change Through Agent-Based Modeling (Porozumění změnám kultury Anasaziů prostřednictvím agentového modelování)*. Working Papers of the Santa Fe

Institute, 98-10-094.

Delworth, T.L. a T.R. Knutson. 2000. Simulace globálního oteplování na počátku 20. století. *Science* . 287(5461):2246-2250.

deMenocal, P., J. Ortiz, T. Guilderson a M. Sarnthein. 2000. Koherentní proměnlivost klimatu ve vysokých a nízkých zeměpisných šířkách během holocenního teplého období. *Science* 288:2198-2202.

- Deslauriers, A., H. Morin a Y. Bégin. 2003a. Cellular phenology of annual ring formation of *Abies balsamea* in the Québec boreal forest (Canada) [Buněčná fenologie tvorby letokruhů jedle bělokoré v boreálním lese v Québecu (Kanada)]. *Canadian Journal of Forest Research* 33:190-200.
- Deslauriers, A., H. Morin, C. Urbinati a M. Carrer. 2003b. Denní odezva přírůstků poloměru kmene jedle balzámové (*Abies balsamea* (L.) Mill.) na počasí na základě dendrometrické analýzy v boreálních lesích Québecu (Kanada). *Trees* 17:477-484.
- Diamond, J.M. 2005. *Collapse: J.: Kolaps: Jak si společnosti vybírají, zda selžou, nebo uspějí*. Penguin, New York.
- Dlugokencky, E.J., L.P. Steele, P.M. Lang a K.A. Masarie. 1994. The growth rate and distribution of atmospheric methane (Rychlost růstu a distribuce atmosférického metanu). *Journal of Geophysical Research* 99:17,021-17,043.
- Dobbertin, M.K. a H.D. Grissino-Mayer. 2004. Bibliografie dendrochronologie a slovník dendrochronologie: dva nové online nástroje pro výzkum letokruhů stromů. *Tree-Ring Research* 60:101-104.
- Domack, E., D. Duran, A. Leventer, S. Ishman, S. Doane, S. McCallum, D. Amblas, J. Ring, R. Gilbert a M. Prentice. 2005. Stabilita ledového šelfu Larsen B na Antarktickém poloostrově během holocénu. *Nature* 436:681-685.
- Draper, N. a H. Smith. 1981. *Applied Regression Analysis*. 2nd ed. Wiley, New York.
- Druffel, E.M. 1981. Radiocarbon in annual coral rings from the eastern tropical Pacific ocean (Radiouhlík v ročních korálových kruzích z východního tropického Tichého oceánu). *Geophysical Research Letters* 8:59-62.
- Druffel, E.R.M. 1989. Desetiletá proměnlivost ventilace v severním Atlantiku: vysoce přesná měření radiouhlíku v pásových korálech. *Journal of Geophysical Research* 94(C3):3271- 3285.
- Druffel, E.R.M. 1997. Pulsy rychlé ventilace v povrchovém oceánu severního Atlantiku během minulého století. *Science* 275:1454-1457.
- Druffel, E.R.M., S. Griffin, T. Guilderson, M. Kashgarian a D. Schrag. 2001. Changes of subtropical North Pacific radiocarbon and correlation with climate variability (Změny subtropického radiokarbonu v severním Pacifiku a korelace s proměnlivostí klimatu). *Radiocarbon* 43:15-25.
- Dunbar, R.B., G.M. Wellington, M.W. Colgan a P.W. Glynn. 1994. Eastern Pacific sea surface temperature since 1600 A.D.: the $\Delta 18\text{O}$ record of climate variability in Galapagos corals. *Paleoceanography* 9:291-315.
- Durbin, J. a G.S. Watson. 1950. Testování sériové korelace v regresi metodou nejmenších čtverců. I. *Biometrika* 37:408-428.
- Durbin, J. a G.S. Watson. 1951. Testování sériové korelace v regresi metodou nejmenších čtverců. II. *Biometrika* 38:159-178.
- Durbin, J. a G.S. Watson. 1971. Testování sériové korelace v regresi metodou nejmenších čtverců. III. *Biometrika* 58:1-19.
- Dyurgerov, M. 2003. Horské a subpolární ledovce vykazují zvýšenou citlivost na oteplování klimatu a zintenzivnění koloběhu vody. *Journal of Hydrology* 282:164-176.
- Dyurgerov, M.B. a M.F. Meier. 1997a. Mass balance of mountain and subpolar glaciers: a new global assessment for 1961-1990 (Hmotnostní bilance horských a subpolárních ledovců: nové globální hodnocení za období 1961-1990). *Arctic and Alpine Research* 29:379-391.
- Dyurgerov, M.B. a M.F. Meier. 1997b. Meziroční kolísání globální hmotnostní bilance malých ledovců a jejich podíl na změnách mořské hladiny. *Arctic and Alpine Research* 29:392-402.
- Dyurgerov, M.B. a M.F. Meier. 2000. Změny klimatu ve dvacátém století: důkazy z malých ledovců. *Sborník Národní akademie věd* 97:1406-1411.
- Dyurgerov, M.B. a M.F. Meier. 2005. *Glaciers and the Changing Earth System: a 2004 Snapshot (Ledovce a měnící se zemský systém: snímek z roku 2004)*. Occasional Paper Institute of Arctic and Alpine Research (INSTAAR). University of Colorado, Boulder.
- Eckstein, D., M.G.L. Baillie a H. Egger. 1984. *Dendrochronologické datování*. European Science Foundation, Strasbourg, Francie.
- Eisenhart, C. 1939. Interpretace některých regresních metod a jejich využití v biologickém a industriálním výzkumu. *Annals of Mathematical Statistics* 10:162-186.
- Endfield, G.H., I. Fernández Tejedó a S.L. O'Hara. 2004. Sucho a spory, potopa a vyprahlost: klimatická proměnlivost a lidská reakce v koloniální Oaxace v Mexiku. *Journal of Historical Geography* 30:249-276.
- Esper, J. a F.H. Schweingruber. 2004. Velkoplošné změny stromové linie zaznamenané na Sibiři. *Geophysical Research Letters* 31:L06202.
- Esper, J., E.R. Cook a F.H. Schweingruber. 2002a. Nízkofrekvenční signály v chronologiích dlouhých stromových letokruhů pro rekonstrukci teplotní variability v minulosti. *Science* 295:2250-2253.

Esper, J., F.H. Schweingruber a M. Winiger. 2002b. 1300 let klimatické historie západní střední Asie odvozené z letokruhů stromů. *Holocene* 12:267-277.

- Esper, J., E.R. Cook, P.J. Krusic, K. Peters a F.H. Schweingruber. 2003. Testy metody RCS pro zachování nízkofrekvenční variability v dlouhých chronologiích stromových letokruhů. *Tree-Ring Research* 59:81-98.
- Etheridge, D.M., G.I. Pearman a P.J. Fraser. 1992. Changes in tropospheric methane between 1841 and 1978 from a high accumulation rate Antarctic ice core (Změny troposférického metanu mezi lety 1841 a 1978 z antarktického ledového jádra s vysokou akumulací). *Tellus B* 44(4):282-294.
- Etheridge, D.M., L.P. Steele, R.L. Langenfelds, R.J. Francey, J.-M. Barnola a V.I. Morgan. 1996. Naturální a antropogenní změny atmosférického CO₂ za posledních 1000 let ze vzduchu v antarktickém ledu a firnu. *Journal of Geophysical Research* 101:4115-4128.
- Ferguson, G. a A.D. Woodbury. 2005. The effects of climatic variability on estimates of recharge from temperature profiles (Vliv klimatické proměnlivosti na odhady doplňování zásob z teplotních profilů). *Ground Water* 43:837-842.
- Fieller, E.C. 1954. Některé problémy intervalového odhadu. *Journal of the Royal Statistical Society B* 16:175-185.
- Fisher, D.A., R.M. Koerner a N. Reeh. 1995. Holocenní klimatické záznamy z ledovce Agassiz, Ellesmerův ostrov, NWT, Kanada. *Holocene* 5:19-24.
- Fleitmann, D., S.J. Burns, M. Mudelsee, U. Neff, J. Kramers, A. Mangini a A. Matter. 2003. Holocenní ovlivňování indického monzonu zaznamenané ve stalagmitu z jižního Ománu. *Science* 300:1737-1739.
- Flückiger, J., E. Monnin, B. Stauffer, J. Schwander, T.F. Stocker, J. Chappellaz, D. Raynaud a J.-M. Barnola. 2002. Holocenní záznam N₂O v ledovém jádře s vysokým rozlišením a jeho vztah k CH₄ a N₂O. CO₂. *Global Biogeochemical Cycles* 16(1).
- Folland, C.K., T.R. Karl, J.R. Christy, R.A. Clarke, G.V. Gruza, J. Jouzel, M.E. Mann, J. Oerlemans, M.J. Salinger a S.-W. Wang. 2001a. Pozorovaná proměnlivost a změna klimatu. In: *Změna klimatu 2001: Vědecké základy. Příspěvek pracovní skupiny I ke třetí hodnotící zprávě Mezivládního panelu pro změnu klimatu*. Pp. 99-181. J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell a C.A. Johnson (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, Velká Británie.
- Folland, C.K., N.A. Rayner, S.J. Brown, T.M. Smith, S.S.P. Shen, D.E. Parker, I. Macadam, P.D. Jones, R.N. Jones, N. Nicholls a D.M.H. Sexton. 2001b. Globální změny teploty a jejich nejistoty od roku 1861. *Geophysical Research Letters* 28:2621-2624.
- Folland, C.K., J.A. Renwick, M.J. Salinger a A.B. Mullan. 2002. Relativní vlivy interdekadální pacifické oscilace a ENSO na jihopacifickou konverzní zónu. *Geophysical Research Letters* 29(13):1643.
- Forsythe, G.T.W., J.D. Scourse, I. Harris, C.A. Richardson, P. Jones, K. Briffa a J. Heinemeier. 2003. Towards an absolute chronology for the marine environment (K absolutní chronologii mořského prostředí): The development of a 1000-year record from A. islandica. *Geophysical Research Abstracts* 5:06044.
- Foukal, P., G. North a T. Wigley. 2004. Hvězdný pohled na sluneční variace a klima. *Science* 306:68-69.
- Francou, B., E. Ramirez, B. Cáceres a J. Mendoza. 2000. Vývoj ledovců v tropických Andách v posledních desetiletích 20. století: Chacaltaya, Bolívie, a Antizana, Ekvádor. *Ambio* 29(7):416-422.
- Friedrich, M., S. Remmele, B. Kromer, J. Hofmann, M. Spurk, K. Felix Kaiser, C. Orzel a M. Küppers. 2004. The 12,460-year Hohenheim oak and pine tree-ring chronology from central Europe - A unique annual record for radiocarbon calibration and paleoenvironment reconstructions (Hohenheimská chronologie letokruhů dubů a borovic ze střední Evropy - unikátní roční záznam pro radiokarbonovou kalibraci a rekonstrukci paleoenvironmentu). *Radiocarbon* 46(3):1111-1122.
- Fritts, H.C. 1976. *Tree Rings and Climate*. Academic Press, Londýn.
- Fritts, H.C. 1991. *Reconstructing Large-Scale Climatic Patterns from Tree-Ring Data (Rekonstrukce velkoplošných klimatických vzorců z údajů o letokruzích stromů): A Diagnostic Analysis*. University of Arizona Press, Tucson.
- Fritts, H.C. a T.W. Swetnam. 1989. Dendroekologie: nástroj pro hodnocení změn v minulém a současném lesním prostředí. In: *Advances in Ecological Research*. Pp. 111-188. M. Begon, A.H. Fitter, E.D. Ford a A. MacFadyen (eds). Academic Press, New York.
- Fritts, H.C., T.J. Blasing, B.P. Hayden a J.E. Kutzbach. 1971. Multivariační techniky pro specifikaci vztahů mezi růstem stromů a klimatem a pro rekonstrukci anomálií v paleoklimatu. *Journal of Applied Meteorology* 10:845-864.
- Fritts, H.C., E.A. Vaganov, I.V. Sviderskaya a A.V. Shashkin. 1991. Klimatické změny a struktura letokruhů u jehličnanů: empirické a mechanistické modely šířky letokruhů, počtu buněk, velikosti buněk, tloušťky buněčné stěny a hustoty dřeva. *Climate Research* 1:97-116.
- Fröhlich, C. a J. Lean. 2004. Sluneční zářivý výkon a jeho proměnlivost: důkazy a mechanismy. *The Astronomy and Astrophysics Review* 12(4):273-320.

- Gagan, M.K., L.K. Ayliffe, J.W. Beck, J.E. Cole, E.R.M. Druffel, R.B. Dunbar a D.P. Schrag. 2000. Nové pohledy na tropické paleoklima z korálů. *Quaternary Science Reviews* 19:45-64.
- Ge, Q.-S., J.-Y. Zheng a P.-Y. Zhang. 2001. Stoleté změny prostorového vzorce sucha/povodní ve východní Číně za posledních 2000 let. *Progress in Natural Science* 11(4):280-287.
- Gerber, S., F. Joos, P. Brügger, T.F. Stocker, M.E. Mann, S. Sitch a M. Scholze. 2003. Constraining temperature variations over the last millennium by comparing simulated and observed atmospheric CO₂. *Climate Dynamics* 20:281-299.
- Goosse, H., T.J. Crowley, E. Zorita, C.M. Ammann, H. Renssen a E. Driesschaert. 2005. Modelování klimy posledního tisíciletí: co způsobuje rozdíly mezi simulacemi. *Geophysical Research Letters* 32:GL022368.
- Gosnold, W.D., P.E. Todhunter a W. Schmidt. 1997. The borehole temperature record of climate warming in the mid-continent of North America (Záznamy teplot z vrtů o oteplování klimatu ve střední části Severní Ameriky). *Global and Planetary Change* 15:33-45.
- Grace, J. 1988. Teplota jako určující faktor produktivity rostlin. In: *Plants and Temperature*. Pp. 91-107. S.P. Long a F.I. Woodward (eds.). Society for Experimental Biology, Cambridge, U.K.
- Grattan, J., and M. Brayshay. 1995. An amazing and portentous summer: environmental and social reakce Británie na erupci islandské sopky v roce 1783. *Geographical Journal* 161:125-134.
- Graumlich, L.J. 1991. Subalpine tree growth, climate, and increasing CO₂: an assessment of recent growth trends (Růst subalpínských stromů, klima a zvyšující se obsah CO₂: zhodnocení nedávných růstových trendů). *Ecology* 72(1):1-11.
- Graybill, D.A. a S.B. Idso. 1993. Detecting the aerial fertilization effect of atmospheric CO₂ enrichment in tree ring chronologies (Zjišťování vlivu vzdušného hnojení v důsledku obohacení atmosféry o CO₂ v chronologiích letokruhů stromů). *Global Geochemical Cycles* 7(1):81-95.
- Grissino-Mayer, H.D. 1997. Počítačově asistované ověření měření letokruhů stromů nezávislým pozorovatelem. *Tree-Ring Bulletin* 54:29-41.
- Grissino-Mayer, H.D. 2003. Příručka a návod pro správné používání přírůstkového vrtáku. *Tree-Ring Research* 59(2):63-79.
- Grissino-Mayer, H.D. a H.C. Fritts. 1997. The International Tree-Ring Data Bank: an enhanced global database serving the global scientific community (Mezinárodní databáze stromových kruhů: rozšířená globální databáze sloužící světové vědecké komunitě). *Holocene* 7(2):235-238.
- Grove, J.M. 2004. *Malá doba ledová. J.: Starověké a moderní ledové doby*. Routledge, New York.
- Grudd, H., K.R. Briffa, W. Karlén, T.S. Bartholin, P.D. Jones a B. Kromer. 2002. A 7400-year tree-ring chronology in northern Swedish Lapland: natural climatic variability expressed on annual to millennial timescales (7400letá chronologie stromových letokruhů v severošvédském Laponsku: přirozená klimatická variabilita vyjádřená v ročních až tisíciletých časových intervalech). *Holocene* 12(6):657-665.
- Guilderson, T.P. a D.P. Schrag. 1998. Abrupt shift in subsurface temperatures in the tropical pacific associated with changes in El Niño (Náhlá změna podpovrchových teplot v tropickém Pacifiku spojená se změnami El Niño). *Science* 281(5374):240-243.
- Gunnarson, B.E. a H.W. Linderholm. 2002. Low-frequency summer temperature variation in central Sweden since the tenth century inferred from tree rings (Nízkofrekvenční kolísání letních teplot ve středním Švédsku od 10. století na základě letokruhů stromů). *Holocene* 12(6):667-671.
- Hamilton, J.G., E.H. DeLucia, K. George, S.L. Naidu, A.C. Finzi a W.H. Schlesinger. 2002. Forest balance uhlíku při zvýšeném obsahu CO₂. *Oecologia* 131(2):250-260.
- Hansen, J. 2004. Zneškodnění časované bomby globálního oteplování. *Scientific American* 290(3):0036-8733.
- Hansen, J. a S.L. Lebedev. 1987. Globální trendy naměřené přizemní teploty vzduchu. *Journal of Geophysical Research* 92:13,354-13,372.
- Hansen, J., R. Ruedy, M. Sato, M. Imhoff, W. Lawrence, D. Easterling, T. Peterson a T. Karl. 2001. Bližší pohled na Spojené státy a globální změny povrchové teploty. *Journal of Geophysical Research* 106(D20):23947-23963.
- Hansen, J., L. Nazarenko, R. Ruedy, M. Sato, J. Willis, A. Del Genio, D. Koch, A. Lacis, K. Lo, S. Menon, T. Novakov, J. Perlwitz, G. Russell, G.A. Schmidt a N. Tausnev. 2005. Energetická nerovnováha Země: potvrzení a důsledek. *Science* 308:1431-1435.
- Hardy, D.R., M. Vuille a R.S. Bradley. 2003. Variabilita akumulace sněhu a izotopové složení na Nevado Sajama, Bolívie. *Journal of Geophysical Research* 108(D22): Art. No. 4693.
- Harris, R.N. a D.S. Chapman. 1995. Climate change on the Colorado Plateau of eastern Utah inferred from borehole temperatures (Změny klimatu na Coloradské plošině ve východním Utahu na základě teplot z vrtů). *Journal of Geophysical Research* 100(B4):6367-6381.
- Harris, R.N. a D.S. Chapman. 2001. Klimatické oteplování ve středních zeměpisných šířkách (30°-60° s. š.) odvozené z kombinace teplot ve vrtech a teplot vzduchu na povrchu. *Geophysical Research Letters* 28(5):747-750.
- Hassan, F.A. 1981. Historické povodně na Nilu a jejich důsledky pro klimatické změny. *Science* 212:1142-1145.
- Hastenrath, S. 2005. The glaciers of Mount Kenya 1899-2004. *Erdkunde* 59:120-125.
- Hättenschwiler, S., I.T. Handa, L. Egli, R. Asshoff, W. Ammann a C. Körner. 2002. Atmosférické

obohacování jehličnanů alpínského pásma CO_2 . *New Phytologist* 156(3):363-375.

- Haug, G.H., D. Gunther, L.C. Peterson, D.M. Sigman, K.A. Hughen a B. Aechlimann. 2003. Climate and the collapse of Maya civilization (Klíma a kolaps mayské civilizace). *Science* 299:1731-1735.
- Hegerl, G.C. 2006. Klíma posledních 1500 let: zvýšená variabilita a otisk skleníkového oteplování. Prezentace pro Výbor pro rekonstrukce povrchových teplot za posledních 2000 let. Powerpointová prezentace. 2. března 2006, Washington, DC.
- Hegerl, G.C., T.J. Crowley, S.K. Baum, K.-Y. Kim a W.T. Hyde. 2003. Detekce vulkanických, slunečních a skleníkových signálů v paleorekonstrukcích teploty severní polokoule. *Geophysical Research Letters* 30:GL016635.
- Hegerl, G.C., T.J. Crowley, W.T. Hyde a D.J. Frame. 2006. Climate sensitivity constrained by temperature reconstructions over the past seven centuries (Citlivost klimatu omezená rekonstrukcemi teplot v posledních sedmi stoletích). *Nature* 440:1029-1032.
- Helama, S., M. Lindholm, M. Timonen, J. Meriläinen a M. Eronen. 2002. Supra-long Scots pine tree-ring record for Finnish Lapland (Dlouhodobý záznam letokruhů borovice lesní ve finském Laponsku): Část 2, Meziroční až stoletá variabilita letních teplot za 7500 let. *Holocene* 12(6):681-687.
- Held, I.M. a B.J. Soden. 2000. Zpětná vazba vodní páry a globální oteplování. *Annual Review of Energy and the Environment* 25:441-475.
- Helle, G. a G.H. Schleser. 2004. Kromě fixace CO_2 pomocí Rubisco - interpretace variability $13\text{C}/12\text{C}$ v letokruzích stromů na základě nových vnitrosezónních studií na listnatých stromech. *Plant, Cell & Environment* 27(3):367.
- Henderson, K.A., L.G. Thompson a P.-N. Lin. 1999. Zaznamenání El Niño v záznamech $\Delta 18\text{O}$ ledového jádra z Nevado Huascarán, Peru. *Journal of Geophysical Research* 104(D24):31,053-31,066.
- Hendy, E.J., M.K. Gagan, C.A. Alibert, M.T. McCulloch, J.M. Lough a P.J. Isdale. 2002. Abrupt decrease in tropical Pacific sea surface salinity at end of Little Ice Age (Náhlý pokles slanosti mořské hladiny v tropickém Pacifiku na konci malé doby ledové). *Science* 295:1511-1514.
- Hinkley, D.V. a S. Wang. 1991. Efektivita robustních standardních chyb pro regresní koeficienty. *Communications in Statistics, Theory and Methods* 20:1-11.
- Hodell, D.A., J.H. Curtis a M. Brenner. 1995. Možná úloha klimatu při kolapsu klasické mayské civilizace. *Nature* 375:391-393.
- Hodell, D.A., M. Brenner, J.H. Curtis a T. Guilderson. 2001. Solar forcing of drought frequency in the Maya lowlands (Sluneční vliv na četnost sucha v mayských nížinách). *Science* 292(5520):1367-1370.
- Hoffmann, G., E. Ramirez, J.D. Taupin, B. Francou, P. Ribstein, R. Delmas, H. Dürr, R. Gallaire, J. Simões, U. Schotterer, M. Stievenard a M. Werner. 2003. Koherentní izotopová historie andských ledových jader v posledním století. *Geophysical Research Letters* 30(4): Art. No. 1179.
- Holmes, R.L. 1983. Počítačem podporovaná kontrola kvality při datování a měření letokruhů stromů. *Tree-Ring Bulletin* 43:69-78.
- Hormes, A., B.U. Müller a C. Schlüchter. 2001. The Alps with little ice: evidence for eight Holocene phases of reduced glacier extent in the Central Swiss Alps (Alpy s malým množstvím ledu: důkazy o osmi holocenních fázích sníženého rozsahu ledovců v centrálních švýcarských Alpách). *Holocene* 11(3):255-265.
- Hoyt, D.V. 2006. Urban Heat Islands and Land Use Changes (Městské tepelné ostrovy a změny ve využití půdy). Dostupné online: <http://www.warwickhughes.com/hoyt/uhi.htm> [přístup 13. dubna 2006].
- Hoyt, D.V. a K.H. Schatten. 1993. A discussion of plausible solar irradiance variations, 1700-1992 (Diskuse o pravděpodobných změnách slunečního záření v letech 1700-1992). *Journal of Geophysical Research* 98:18 895-18 906.
- Huang, S. a H. Pollack. 1998. *Global Borehole Temperature Database for Climate Reconstruction (Globální databáze teplot z vrtů pro rekonstrukci klimatu)*. IGBP PAGES/World Data Center-A for Paleoclimatology Data Contribution Series No. 19989-044. NOAA/NGDC Paleoclimatology Program, Boulder, CO.
- Huang, S.P., H.N. Pollack a P.-Y. Shen. 2000. Teplotní trendy za posledních pět století zjištěné z teplot ve vrtech. *Nature* 403(6771):756-758.
- Hughes, M.K. 2002. Dendrochronologie v klimatologii - současný stav. *Dendrochronologia* 20(1- 2):95-116.
- Hughes, M.K., F.H. Schweingruber, D. Cartwright a P.M. Kelly. 1984. July-August temperature at Edinburgh between 1721 and 1975 from tree-ring density and width data [Teplota v červenci a srpnu v Edinburghu v letech 1721-1975 na základě údajů o hustotě a šířce stromových letokruhů]. *Nature* 308(5957):341- 344.
- Hunt, Jr., E.R., F.C. Martin a S.W. Running. 1991. Simulating the effects of climatic variation on stem carbon accumulation of a ponderosa pine stand: comparison with annual growth increment data (Simulace vlivu klimatických výkyvů na akumulaci uhlíku v porostu borovice ponderosa: srovnání s údaji o ročním přírůstu). *Tree Physiology* 9:161-171.
- Huybers, P. 2005. Comment on "Hockey sticks, principal components, and spurious significance" by S.

McIntyre and R. McKittrick. *Geophysical Research Letters* 32:L20705.
IPCC (Mezivládní panel pro změnu klimatu). 1990. *Scientific Assessment of Climate Change- Report of Working Group I*. J.T. Houghton, G.J. Jenkins, and J.J. Ephraums (eds.). První hodnotící zpráva, svazek 1. Cambridge University Press, Cambridge, Velká Británie.

- IPCC (Mezivládní panel pro změnu klimatu). 2001. *Změna klimatu 2001: Vědecké základy*. Cambridge University Press, Cambridge, Velká Británie.
- Jacoby, G.C. a R.D. D'Arrigo. 1995. Tree-ring width and density evidence of climatic and potential forest change in Alaska (Šířka a hustota stromových letokruhů jako důkaz klimatických a potenciálních změn lesů na Aljašce). *Global Biogeochemical Cycles* 9:227-234.
- Jiang, H., M.-S. Seidenkrantz, K.L. Knudsen a J. Eiríksson. 2002. Late Holocene sea-surface temperatures based on a diatom record from the north Icelandic shelf. *Holocene* 12:137-146.
- Johnson, R.A. a D.W. Wichern. 2002. *Applied Multivariate Statistical Analysis*. 5th ed. Prentice-Hall, Upper Saddle River, N.J.
- Jolliffe, I.T. 2002. *Principal Component Analysis*. Springer, New York.
- Jones, P.D. a M.E. Mann. 2004a. Klima v uplynulých tisíciletích. IGBP PAGES/World Data Center for Paleoclimatology Data Contribution Series #2004-085. NOAA/NGDC Paleoclimatology Program, Boulder, Co, USA.
- Jones, P.D. a M.E. Mann. 2004b. Klima v uplynulých tisíciletích. *Reviews of Geophysics* 42:RG2002.
- Jones, P.D., T.J. Osborn a K.R. Briffa. 1997. Estimating sampling errors in large-scale temperature averages (Odhad chyb výběru u velkoplošných teplotních průměrů). *Journal of Climate* 10:2548-2568.
- Jones, P.D., K.R. Briffa, T.P. Barnett a S.F.B. Tett. 1998. High-resolution palaeoclimatic records for the last millennium: interpretation, integration and comparison with general circulation model control-run temperatures (Paleoklimatické záznamy s vysokým rozlišením pro poslední tisíciletí: interpretace, integrace a srovnání s kontrolními teplotami modelu všeobecné cirkulace). *Holocene* 8:455-471.
- Jones, P.D., T.J. Osborn, K.R. Briffa, C.K. Folland, E.B. Horton, L.V. Alexander, D.E. Parker a N.A. Rayner. 2001. Adjusting for sampling density in grid box land and ocean surface temperature time series (Úprava hustoty vzorkování v časových řadách teploty povrchu pevniny a oceánů). *Journal of Geophysical Research* 106:3371-3380.
- Jones, M.D., C.N. Roberts, M.J. Leng a M. Türkeş. 2006. Pozdně holocenní izotopový záznam z Turecka s vysokým rozlišením a vazby na severoatlantické a monzunové klima. *Geology* 34(5):361-364.
- Joos, F. 2005. Radiative forcing and the ice core greenhouse record (Radiční působení a skleníkový záznam z ledových jader). *PAGES News* 13:11-13.
- Joos, F., I.C. Prentice, S. Sitch, R. Meyer, G. Hooss, G.-K. Plattner, S. Gerber a K. Hasselmann. 2001. Zpětná vazba globálního oteplování na absorpci uhlíku v půdě podle emisních scénářů IPCC. *Global Biogeochemical Cycles* 15:891-907.
- Jouzel, J., R.B. Alley, K.M. Cuffey, W. Dansgaard, P. Grootes, G. Hoffmann, S.J. Johnsen, R.D. Koster, D. Peel, C.A. Shuman, M. Stievenard, M. Stuiver a J. White. 1997. Validity of the temperature reconstruction from water isotopes in ice cores [Platnost rekonstrukce teploty z izotopů vody v ledových jádrech]. *Journal of Geophysical Research* 102(C12):26,471-26,488.
- Junttila, O. 1986. Effects of temperature on shoot growth in northern provenances of *Pinus sylvestris* L. *Tree Physiology* 1:185-192.
- Kalela-Brundin, M. 1999. Klimatické informace z letokruhů borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) a rekonstrukce letních teplot do roku 1500 n. l. ve Femundsmarce ve východním Norsku pomocí částečné regrese nejmenších čtverců (PLS). *Holocene* 9(1):59-77.
- Kaplan, A., M. Cane, Y. Kushnir, A. Clement, M. Blumenthal a B. Rajagopalan. 1998. Analyses of global sea surface temperature 1856-1991 (Analýzy globální teploty povrchu moří v letech 1856-1991). *Journal of Geophysical Research* 103(C9):18,567-18,589.
- Karl, T.R., R.W. Knight a J.R. Christy. 1994. Globální a hemisférické teplotní trendy: nejistoty související s nedostatečným prostorovým vzorkováním. *Journal of Climate* 7(7):1144-1163.
- Kaser, G. 1999. Přehled moderních výkyvů tropických ledovců. *Globální a planetární změny* 22(1-4):93-103.
- Kaser, G., D.R. Hardy, T. Mölg, R.S. Bradley a T.M. Hyear. 2004. Moderní ústup ledovců na Kilimandžáru jako důkaz klimatických změn: pozorování a fakta. *International Journal of Climatology* 24:329-339.
- Kaspar, F., N. Kuhl, U. Cubasch a T. Litt. 2005. Srovnání teplot v Evropě v eemském interglaciálu na základě modelu a dat. *Geophysical Research Letters* 32:L11703.
- Kavanaugh, J.L. a K.M. Cuffey. 2003. Prostorové a časové změny $\Delta 18O$ a ΔD v antarktických srážkách. zopakování. *Global Biogeochemical Cycles* 17(1):1017.
- Keeling, C.D. a T.P. Whorf. 2005. Záznamy atmosférického CO_2 z míst v síti pro odběr vzorků ovzduší SIO. In: *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, TN. Dostupné na: <http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/co2/sio-keel-flask/sio-keel-flask.html>.
- Keigwin, L.D. 1996. Malá doba ledová a středověké teplé období v Sargasovém moři. *Science* 274:1504-1508.
- Keigwin, L.D. a E.A. Boyle. 2000. Detekce holocenních změn termohalinní cirkulace. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 97:1343-1346.

- Keigwin, L.D. a R.S. Pickart. 1999. Svahový vodní proud nad Laurentinským vějířem v meziročním až tisíciletém časovém horizontu. *Science* 286:520-523.
- Keppler, F., J.T.G. Hamilton, M. Braß a T. Röckmann. 2006. Emise metanu ze suchozemských rostlin v aerobních podmínkách. *Nature* 439:187-191.
- Khromova, T. E., M.B. Dyrgerov a R.G. Barry. 2003. Změny rozsahu ledovce v pohorí Akshirak ve střední Asii na konci 20. století, zjištěné na základě historických dat a snímků ASTER. *Geophysical Research Letters* 30(16): Art. No. 1863.
- Kienast, F. a R.J. Luxmoore. 1988. Tree-ring analysis and conifer growth responses to increased atmosférických hladin CO_2 . *Oecologia* 76:487-95.
- Kienast, F. a F.H. Schweingruber. 1986. Dendroekologické studie v oblasti Front Range, Colorado, USA. *Arctic and Alpine Research* 18(3):277-288.
- Kjällgren, L. a L. Kullman. 2002. Geografické zákonitosti stromových limitů smrku ztepilého a borovice lesní v jižních švédských Skandináviích. *Norwegian Journal of Geography* 56:237-245.
- Knapp, P.A., P.T. Soulé a H.D. Grissino-Mayer. 2001. Detekce potenciálních regionálních účinků zvýšené atmosférického CO_2 na rychlost růstu jalovce západního. *Global Change Biology* 7:903-917.
- Knutti, R., T.F. Stocker, F. Joos a G.-K. Plattner. 2002. Constraints on radiative forcing and future (Omezení radiačního působení a budoucí změny klimatu na základě pozorování a souborů klimatických modelů. *Nature* 416:719-723.
- Koinig, K.A., R. Schmidt, S. Sommaruga-Wögrath, R. Tessadri a R. Psenner. 1998. Klimatické změny jako hlavní příčina změn pH ve vysokohorském jezeře. *Water, Air, & Soil Pollution* 104(1-2):167-180.
- Körner, C. 1999. *Alpský rostlinný svět: C.: Funkční ekologie rostlin vysokohorských ekosystémů*. Springer-Verlag, Berlin.
- Körner, C. 2003. Omezení obsahu uhlíku ve stromech. *Journal of Ecology* 91:4-17.
- Kostiainen, K., S. Kaakinen, P. Saranpää, B.D. Sigurdsson, S. Linder a E. Vapaavuori. 2004. Effect of zvýšené koncentrace $[\text{CO}_2]$ na vlastnosti dřeva kmene dospělého smrku ztepilého pěstovaného při různé dostupnosti živin v půdě. *Global Change Biology* 10(9):1526-1538.
- Kuhnert, H., J. Pätzold, B. Hatcher, K.H. Wyrwoll, A. Eisenhauer, L.B. Collins, Z.R. Zhu a G. Wefer. 1999. A 200-year coral stable oxygen isotope record from a high-latitude reef off western Australia (200letý záznam stabilních izotopů kyslíku korálů z vysokohorského útesu u západní Austrálie). *Coral Reefs* 18(1):1-12.
- Kullman, L. 1998. Stromové limity a horské lesy ve švédských Skandináviích: citlivé biomonitory klimatických změn a proměnlivosti. *Ambio* 27:312-321.
- Lachenbruch, A.H. a B.V. Marshall. 1986. Changing climate: geothermal evidence from permafrost in the Alaskan Arctic (Mění se klima: geotermální důkazy z permafrostu v aljašské Arktidě). *Science* 234(4777):689-696.
- Ladurie, E. le Roy. 1972. *Times of Feast, Times of Famine (Časy hostiny, časy hladu)*. George Allen and Unwin, Londýn.
- Laird, K.R., S.C. Fritz a B.F. Cumming. 1998. A diatom-based reconstruction of drought intensity, duration, and frequency from Moon Lake, North Dakota: a sub-decadal record of the last 2300 years (Rekonstrukce intenzity, trvání a četnosti sucha na základě diatomů z jezera Moon Lake v Severní Dakotě: subdekadální záznam posledních 2300 let). *Journal of Paleolimnology* 19(2):161-179.
- LaMarche, V.C. 1974. Paleoklimatické závěry z dlouhých záznamů stromových letokruhů. *Science* 183:1043-1048.
- LaMarche, V.C. a T.P. Harlan. 1973. Accuracy of tree-ring dating of bristlecone pine for calibration of the radiocarbon time scale [Přesnost datování stromových letokruhů borovice štetinovitě pro kalibraci radiokarbonové časové stupnice]. *Journal of Geophysical Research* 78(36):8849-8858.
- LaMarche, V.C., D.A. Graybill, H.C. Fritts a M.R. Rose. 1984. Increasing atmospheric carbon dioxide: tree ring evidence for growth enhancement in natural vegetation (Zvyšující se obsah oxidu uhličitého v atmosféře: důkazy o růstu přirozené vegetace). *Science* 225:1019-1021.
- Lamb, H.H. 1982. *Klima, dějiny a moderní svět*. Methuen: Londýn a New York.
- Lamoureux, S.F. a R.S. Bradley. 1996. A late Holocene varved sediment record of environmental change from northern Ellesmere Island, Canada (Záznam změn prostředí ze severního Ellesmerova ostrova v Kanadě z pozdního holocénu). *Journal of Paleolimnology* 16(2):239-255.
- Lauritzen, S.E. 2003. Reconstructing Holocene climate records from speleothems. In: *Global Change in the Holocene*. Pp. 242-263. A. Mackay, R. Battarbee, J. Birks a F. Oldfield (eds.). Arnold, London.
- Lauritzen, S.E. a J. Lundberg. 1999. Calibration of the speleothem delta function: an absolute temperature record for the Holocene in northern Norway (Kalibrace delta funkce speleotému: absolutní teplotní záznam pro holocén v severním Norsku). *Holocene* 9:659-670.
- Lean, J. 2005a. Život s proměnlivým sluncem. *Physics Today* 58:32-38.
- Lean, J. 2005b. Solární vliv na změnu klimatu: současný stav. *PAGES News* 13:13-15.
- Lean, J., J. Beer a R. Bradley. 1995. Rekonstrukce slunečního záření od roku 1610: důsledky pro změnu klimatu. *Geophysical Research Letters* 22:3195-3198.
- Leung, L.-Y. a G.R. North. 1991. Atmosférická variabilita na zonálně symetrické pevninské planetě.

Journal of Climate 4:753-765.

Linsley, B.K., G.M. Wellington a D.P. Schrag. 2000. Desetiletá proměnlivost teploty povrchu moře v subtropickém jižním Pacifiku od roku 1726 do roku 1997 našeho letopočtu. *Science* 290:1145-1148.

- Linsley, B.K., G.M. Wellington, D.P. Schrag, L. Ren, M.J. Salinger a A.W. Tudhope. 2004. Geochemical evidence from corals for changes in the amplitude and spatial pattern of South Pacific interdecadal climate variability over the last 300 years (Geochemické důkazy z korálů o změnách amplitudy a prostorového vzorce interdekadální klimatické variability v jižním Pacifiku za posledních 300 let). *Climate Dynamics* 22(1):1-11.
- Liu, X. a B. Chen. 2000. Klimatické oteplování na Tibetské náhorní plošině v posledních desetiletích. *International Journal of Climatology* 20(14):1729-1742.
- Lloyd, A.H. a C.L. Fastie. 2002. Prostorová a časová variabilita růstu a klimatické odezvy stromů na Aljašce. *Climatic Change* 52:481-509.
- Lloyd, A. a L.J. Graumlich. 1997. Holocenní dynamika stromových lesů v Sierra Nevadě. *Ecology* 78(4):1199-1210.
- Lough, J.M. 2004. A strategy to improve the contribution of coral data to high-resolution paleoclimatology. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* 204:115-143.
- Loveys, B.R., I. Scheurwater, T.L. Pons, A.H. Fitter a O.K. Atkin. 2002. Growth temperature influences the underlying components of relative growth rate: an investigation using inherently fast- and slow-growing plant species (Růstová teplota ovlivňuje základní složky relativní růstové rychlosti: zkoumání s využitím přirozeně rychle a pomalu rostoucích druhů rostlin). *Plant, Cell and Environment* 25:975-987.
- Luckman, B.H. a R.J.S. Wilson. 2005. Letní teploty v kanadských Skalístých horách v posledním tisíciletí: revidovaný záznam. *Climate Dynamics* 24:131-144.
- Luterbacher, J., D. Dietrich, E. Xoplaki, M. Grosjean a H. Wanner. 2004. European seasonal and annual temperature variability, trends, and extremes since 1500 (Evropská sezónní a roční proměnlivost teplot, trendy a extrémy od roku 1500). *Science* 303(5663):1499-1503.
- Luterbacher, J. a 48 spoluautorů. 2006. Proměnlivost středomořského klimatu v posledních staletích: přehled. In: *The Mediterranean Climate: Přehled hlavních charakteristik a problémů*. Pp. 27-148. P. Lionello, P. Malanotte-Rizzoli a R. Boscolo (eds.). Elsevier, Amsterdam.
- MacDonald, G.M., J.M. Szeicz, J. Claricoates a K.A. Dale. 1998. Response of the central Canadian treeline to recent climate changes (Reakce stromového patra střední Kanady na nedávné klimatické změny). *Annals of the Association of American Geographers* 88:183-208.
- Majorowicz, J. a J. Safanda. 2005. Measured versus simulated transients of temperature logs-a test of borehole climatology (Naměřené versus simulované přechodové jevy teplotních záznamů - test klimatologie vrtů). *Journal of Geophysics and Engineering* 2:291-298.
- Majorowicz, J., S.E. Grasby, G. Ferguson, J. Safanda a W. Skinner. 2006. Paleoklimatické rekonstrukce v západní Kanadě na základě teplotních záznamů z vrtů: ovlivnění teploty povrchového vzduchu a proudění podzemní vody. *Climate of the Past* 2:1-10. Dostupné online: www.climate-of-the-past.net/cp/2/1 [přístup 13. dubna 2006].
- Manley, G. 1974. Central England temperatures: monthly means 1659 to 1973. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 100:389-405.
- Mann, M.E. a P.D. Jones. 2003a. *2,000 Year Hemispheric Multi-proxy Temperature Reconstructions*. IGBP PAGES/World Data Center for Paleoclimatology Data Contribution Series #2003-051. NOAA/NGDC Paleoclimatology Program, Boulder, CO.
- Mann, M.E. a P.D. Jones. 2003b. Globální povrchové teploty za poslední dvě tisíciletí. *Geophysical Research Letters* 30(15):1820.
- Mann, M.E., R.S. Bradley a M.K. Hughes. 1998. Global scale temperature patterns and climate forcing over the past 6 six centuries (Teplotní průběh v globálním měřítku a klimatické vlivy v posledních šesti stoletích). *Nature* 392:779-787.
- Mann, M.E., R.S. Bradley a M.K. Hughes. 1999. Northern Hemisphere temperatures during the past millennium: inferences, uncertainties, and limitations (Teploty na severní polokouli v uplynulém tisíciletí: závěry, nejistoty a omezení). *Geophysical Research Letters* 26(6):759-762.
- Mantua, N.J., S.R. Hare, Y. Zhang, J.M. Wallace a R.C. Francis. 1997. Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production (Mezidekadální oscilace klimatu v Pacifiku s dopadem na produkci lososů). *Bulletin of the American Meteorological Society* 78(6):1069.
- Marchitto, T.M. a P.B. deMenocal. 2003. Late Holocene variability of upper North Atlantic deep water temperature and salinity (Pozdně holocenní proměnlivost teploty a salinity hlubokých vod horního severního Atlantiku). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 4(12):1100.
- Mark, B.G. a G.O. Seltzer. 2005. Evaluation of recent glacier recession in the Cordillera Blanca, Peru (AD 1962-1999): spatial distribution of mass loss and climatic forcing (Vyhodnocení nedávného ústupu ledovce v Cordillera Blanca, Peru (1962-1999): prostorové rozložení úbytku hmoty a klimatických vlivů). *Quaternary Science Reviews* 24:2265-2280.
- Masson, V., F. Vimeux, J. Jouzel, V. Morgan, M. Delmotte, P. Ciais, C. Hammer, S. Johnsen, V.Y. Lipenkov, E. Mosley-Thompson, J.-R. Petit, E.J. Steig, M. Stievenard a R. Vaikmae. 2000. Ho-locenní proměnlivost klimatu v Antarktidě na základě 11 izotopových záznamů z ledových jader. *Quaternary Research* 54:348-358.

Masson-Delmotte, V., M. Kageyama, P. Braconnot, S. Charbit, G. Krinner, C. Ritz, E. Guilyardi, J. Jouzel, A. Abe-Ouchi, M. Crucifix, R.M. Gladstone, C.D. Hewitt, A. Kitoh, A. Legrande, O. Marti, U. Merkel, T. Motoi, R. Ohgaito, B.L. Otto-Bliesner, W.R. Peltier, I. Ross, P.J. Valdes, G. Vettoretti, N. Weber a F. Wolk. 2006. Past and future polar amplification of climate change: climate model intercomparisons and ice-core constraints (Minulé a budoucí zesílení klimatických změn v polárních oblastech: porovnání klimatických modelů a omezení z ledových jader). *Climate Dynamics* 26(5):513-529.

- McDermott, F., S. Frisia, Y. Huang, A. Longinelli, B. Spiro, T.H.E. Heaton, C.J. Hawkesworth, A. Borsato, E. Keppens, I.J. Fairchild, K. van der Borg, S. Verheyden a E. Selmo. 1999. Holocénní proměnlivost klimatu v Evropě: důkazy z $\Delta^{18}\text{O}$ a texturních změn ve speleotémech. *Quaternary Science Reviews* 18:1021-1038.
- McIntosh, R.J., J.A. Tainter a S.K. McIntosh. 2000. *The Way the Wind Blows: R.: Climate, History, and Human Action*. Columbia University Press, New York.
- McIntyre, S. a R. McKittrick. 2003. Corrections to the Mann et al. (1998) proxy data base and Northern Hemispheric average temperature series [Opravy databáze proxy dat a řady průměrných teplot na severní polokouli]. *Energy & Environment* 14(6):751-771.
- McIntyre, S. a R. McKittrick. 2005a. Hokejky, hlavní komponenty a falešná významnost. *Geophysical Research Letters* 32:L03710.
- McIntyre, S. a R. McKittrick. 2005b. Odpověď na komentář Huyberse k článku "Hockey sticks, principal components, and spurious significance". *Geophysical Research Letters* 32:L20713.
- Meehl, G.A., W.M. Washington, C.M. Ammann, J.M. Arblaster, T.M.L. Wigley a C. Tebaldi. 2004. Kombinace přírodních a antropogenních vlivů na klima dvacátého století. *Journal of Climate* 17:3721-3727.
- Meier, M.F., M.B. Dyurgerov a G.J. McCabe. 2003. The health of glaciers: recent changes in glacier regime (Zdraví ledovců: nedávné změny v ledovcovém režimu). *Climatic Change* 59(1-2):123-135.
- Mikola, P. 1962. Teplota a růst stromů v blízkosti severní hranice lesa. In: *Tree Growth*. Pp. 265-274. T.T. Kozłowski (ed.). Ronald Press, New York.
- Millar, C.I., J.C. King, R.D. Westfall, H.A. Alden a D.L. Delany. V tisku. Late Holocene forest dynamic, vulcanism, and climate change at Whitewing Mountain and San Joaquin Ridge, Mono County, Sierra Nevada, CA, USA. *Quaternary Research*.
- Misson, L. 2004. MAIDEN: model pro analýzu ekosystémových procesů v dendroekologii. *Canadian Journal of Forest Research* 34:874-887.
- Moberg, A., D.M. Sonechkin, K. Holmgren, N.M. Datsenko a W. Karlen. 2005a. Rekonstrukce teploty severní polokoule za 2 000 let. IGBP PAGES/World Data Center for Paleoclimatology Data. Contribution Series #2005-019. NOAA/NGDC Paleoclimatology Program, Boulder, CO.
- Moberg, A., D.M. Sonechkin, K. Holmgren, N.M. Datsenko a W. Karlen. 2005b. Vysoce proměnlivé teploty severní polokoule rekonstruované z proxy dat s nízkým a vysokým rozlišením. *Nature* 433:613-617.
- Mölg, T., C. Georges a G. Kaser. 2003. Podíl zvýšeného příchodního krátkovlnného záření na ústupu ledovců Rwenzori ve východní Africe během 20. století. *International Journal of Climatology* 23(3):291-303.
- Monnin, E., E.J. Steig, U. Siegenthaler, K. Kawamura, J. Schwander, B. Stauffer, T.F. Stocker, D.L. Morse, J.-M. Barnola, B. Bellier, D. Raynaud a H. Fischer. 2004. Důkazy o podstatné akumulaci proměnlivosti rychlosti v Antarktídě během holocénu na základě synchronizace CO_2 v ledových jádrech Taylor Dome, Dome C a DML. *Earth and Planetary Science Letters* 224:45-54.
- Myhre, G., E.J. Highwood, K.P. Shine a F. Stordal. 1998. Nové odhady radiačního působení dobře promíchaných skleníkových plynů. *Geophysical Research Letters* 25:2715-2718.
- Naurzbaev, M.M., E.A. Vaganov, O.V. Sidorova a F.H. Schweingruber. 2002. Summer temperatures in eastern Taimyr inferred from a 2427-year late-Holocene tree-ring chronology and earlier floating series [Letní teploty ve východním Tajmyru odvozené z 2427leté pozdněholocénní chronologie stromových letokruhů a starších plovoucích řad]. *Holocene* 12(6):727-736.
- Naurzbaev, M.M., M.K. Hughes a E.A. Vaganov. 2004. Růstové křivky stromů jako zdroj klimatických informací. *Quaternary Research* 62:126-133.
- Nicolussi, K., S. Bortenschlager a C. Körner. 1995. Zvýšení šířky stromového letokruhu u subalpínské borovice *Pinus cembra* z centrálních Alp, které mohou souviset s CO_2 . *Trees* 9(4):181-189.
- Nozaki, Y., D.M. Rye, K.K. Turekian a R.E. Dodge. 1978. 13C and 14C variations on a Bermuda coral. *Geophysical Research Letters* 5:825-828.
- NRC (Národní rada pro výzkum). 1995. *O úplné a otevřené výměně vědeckých dat*. National Academy Press, Washington, D.C.
- NRC. 2001. *Věda o změně klimatu: Analýza některých klíčových otázek*. National Academy Press, Washington, DC.
- NRC. 2003a. *Odhad citlivosti klimatu: Zpráva ze semináře*. The National Academies Press, Washington, D.C.
- NRC. 2003b. *Pochopení zpětných vazeb změny klimatu*. The National Academies Press, Washington, D.C.
- NRC. 2005. *Radiative Forcing of Climate Change*. The National Academies Press, Washington, D.C.

- Oerlemans, J. 1994. Kvantifikace globálního oteplování v důsledku ústupu ledovců. *Science* 264(5156):243-245.
- Oerlemans, J. 2001. *Glaciers and Climate Change*. Swets and Zeitlinger, Lisse, Nizozemsko.
- Oerlemans, J. 2005a. Extrakce klimatického signálu ze 169 ledovcových záznamů. Podpůrný materiál dostupný online: <http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/1107046/DC1>. *Science* 308:675-677.
- Oerlemans, J. 2005b. *Rekonstrukce globální délky ledovce*. IGBP PAGES/World Data Center for Paleoclimatology. Data Contribution Series #2005-059. NOAA/NCDC Paleoclimatology Program, Boulder, CO.
- Oerlemans, J. a J.P.F. Fortuin. 1992. Citlivost ledovců a malých ledovcových čepiček na skleníkové oteplování. *Science* 258(5079):115-117.
- Oerlemans, J., B. Anderson, A. Hubbard, P. Huybrechts, T. Jóhannesson, W.H. Knap, M. Schmeits, A.P. Stroeven, R.S.W. van de Wal, J. Wallinga a Z. Zuo. 1998. Modelování reakce ledovců na oteplování klimatu. *Climate Dynamics* 14(4):267-274.
- Ogilvie, A.E.J. 1992. Documentary evidence for changes in the climate of Iceland, A.D. 1500 to 1800. In: *Podnebí od roku 1500 n. l.* Pp. 92-117. R.S. Bradley a P.D. Jones (eds.). Routledge, London.
- Osborne, C. 1991. Statistická kalibrace: přehled. *International Statistical Review* 59:309-336.
- Osborn, T.J. a K.R. Briffa. 2006. Prostorový rozsah 20. století: oteplení v kontextu posledních 1200 let. *Science* 311:841-844.
- Otto-Bliesner, B.L., S. Marshall, J. Overpeck, G. Miller, A. Hu a členové projektu CAPE Last Interglacial Project. 2006a. Simulating Arctic climate warmth and icefield retreat in the last interglaciation (Simulace oteplování arktického klimatu a ústupu ledových polí v posledním meziledovém období). *Science* 311:1751-1753.
- Otto-Bliesner, B.L., E.C. Brady, G. Clauzet, R. Tomas, S. Levis a Z. Kothavala. 2006b. Last glacial maximum and Holocene climate in CCSM3 (Poslední glaciální maximum a holocenní klima v CCSM3). *Journal of Climate* 19:2526-2544.
- Overpeck, J., K. Hughen, D. Hardy, R. Bradley, M. Case, M. Douglas, B. Finney, K. Gajewski, G. Jacoby, A. Jennings, S. Lamoureux, A. Lasca, G. MacDonald, J. Moore, M. Retelle, S. Smith, A. Wolfe a G. Zielinski. 1997. Arctic environmental change of the last four centuries (Změny životního prostředí v Arktidě v posledních čtyřech stoletích). *Science* 278:1251-1256.
- Parmesan, C. a G. Yohe. 2003. Globální koherentní otisk dopadů změny klimatu v přírodních systémech. *Nature* 421:37-42.
- Parry, M.L. 1978. *Klimatické změny, zemědělství a osídlení*. Folkestone, Dawson.
- Paterson, W.S.B. 1994. *The Physics of Glaciers (Fyzika ledovců)*. Three ed. Pergamon, Oxford, Anglie.
- Pauling, A., J. Luterbacher a H. Wanner. 2003. Hodnocení proxy pro rekonstrukce teplotních polí v Evropě a severním Atlantiku. *Geophysical Research Letters* 30:15.
- Paulsen, J., U.M. Weber a C. Körner. 2000. Růst stromů v blízkosti stromové čáry: náhlý nebo postupný pokles s nadmořskou výškou? *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 32(1):14-20.
- Petit, J.R., J. Jouzel, D. Raynaud, N.I. Barkov, J.-M. Barnola, I. Basile, M. Bender, J. Chappellaz, M. Davis, G. Delaygue, M. Delmotte, V.M. Kotlyakov, M. Legrand, V.Y. Lipenkov, C. Lorius, L. Pépin, C. Ritz, E. Saltzman a M. Stievenard. 1999. Historie klimatu a atmosféry za posledních 420 000 let z ledového jádra Vostok, Antarktida. *Nature* 399:429-436.
- Pfister, C. 1992. Měsíční teploty a srážky ve střední Evropě v letech 1525-1979: kvantifikace dokladů o počasí a jeho účincích. In: *Climate Since A.D. 1500*. Pp. 118-142. R.S. Bradley a P.D. Jones (eds.). Routledge, London.
- Pierrehumbert, R.T. 1999. Huascarán $\Delta 18O$ jako indikátor tropického klimatu během posledního glaciálu. maximálně. *Geophysical Research Letters* 26(9):1345-1348.
- Piovesan, G., F. Biondi, M. Bernabei, A. Di Filippo a B. Schirone. 2005. Prostorové a výškové bioklimatické zóny Italského poloostrova identifikované na základě sítě letokruhů buku (*Fagus sylvatica* L.). *Acta Oecologica* 27:197-210.
- Pollack, H.N. a S.P. Huang. 2000. Rekonstrukce klimatu z podpovrchových teplot. *Annual Reviews in Earth and Planetary Science* 28:339-365.
- Pollack, H.N. a J.E. Smerdon. 2004. Rekonstrukce klimatu z vrtů: prostorová struktura a hemisférické průměry. *Journal of Geophysical Research* 109(D11106).
- Pollack, H.N., J.E. Smerdon a P.E. van Keken. 2005. Proměnlivá sezónní vazba mezi teplotami vzduchu a půdy: jednoduchá reprezentace v termínech podpovrchové tepelné difuzivity. *Geophysical Research Letters* 32:L15405.
- Proctor, C.J., A. Baker, W.L. Barnes a M.A. Gilmour. 2000. A thousand years speleothem proxy record of North Atlantic climate from Scotland (Tisíciletý proxy záznam severoatlantického klimatu ze Skotska). *Climate Dynamics* 16(10-11):815-820.
- Proctor, C., A. Baker a W. Barnes. 2002. Třítisíciletý záznam severoatlantického klimatu. *Climate Dynamics* 19:449-454.

- Quinn, T.M., T.J. Crowley, F.W. Taylor, C. Henin, P. Joannot a Y. Join. 1998. A multi-century stable isotope record from a New Caledonia coral: interannual and decadal sea-surface temperature variability in the Southwest Pacific since 1657 A.D. *Paleoceanography* 13:412-426.
- Ramaswamy, V., O. Boucher, J. Haigh, D. Hauglustaine, J. Haywood, G. Myhre, T. Nakajima, G.Y. Shi a S. Solomon. 2001. Radiative forcing of climate change. In: *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Příspěvek pracovní skupiny I ke třetí hodnotící zprávě Mezivládního panelu pro změnu klimatu). Pp. 349-416. J.T. Houghton et al. (eds.). Cambridge University Press, New York.
- Raynaud, D., T. Blunier, Y. Ono a R.J. Delmas. 2003. The Late Quaternary history of atmospheric trace gases and aerosols: interactions between climate and biogeochemical cycles (Historie stopových plynů a aerosolů v atmosféře v pozdních čtvrtohorách: interakce mezi klimatem a biogeochemickými cykly). In: *Paleoklima, globální změny a budoucnost*. Pp. 13-31. K.D. Alverson, R.S. Bradley a T.F. Pedersen (eds.). Springer-Verlag, New York.
- Robock, A. 2000. Sopečné erupce a klima. *Reviews of Geophysics* 38:191-219.
- Rodbell, D.T., G.O. Seltzer, D.M. Anderson, M.B. Abbott, D.B. Enfield a J.H. Newman. 1999. An ~15 000 let trvajícím záznam aluviace způsobeným jevem El Niño v jihozápadním Ekvádoru. *Science* 283(5401):516-520.
- Root, T.L., J.T. Price, K.R. Hall, S.H. Schneider, C. Rosenzweig a J.A. Pounds. 2003. Fingerprints of global warming on wild animals and plants (Otisky globálního oteplování na volně žijících zvířatech a rostlinách). *Nature* 421:57-60.
- Rosen, A. V tisku. *Civilizing Climate: A.: The Civilization Civilization: Climate Change and Society in the Ancient Near East*. Alta Mira Press.
- Rosenheim, B.E., P.K. Swart, S.R. Thorrold, P. Willenz, L. Berry a C. Latkoczy. 2004. High-resolution Sr/Ca records in sclerosponges calibrated to temperature in situ. *Geology* 32(2):145-148.
- Rossi, S., A. Deslauriers, T. Anfodillo, H. Morin, A. Saracino, R. Motta a M. Borghetti. 2006. Jehličnany v chladném prostředí synchronizují maximální rychlost růstu tvorby letokruhů stromů s délkou dne. *New Phytologist* 170(2):301-310.
- Ruddiman, W.F. 2003. Antropogenní skleníková éra začala před tisíci lety. *Klimatické změny* 61:261-293.
- Ruddiman, W.F. a J.S. Thomson. 2001. The case for human causes of increased atmospheric CH₄ over the last 5000 years (Příčiny nárůstu CH₄ v atmosféře za posledních 5000 let způsobené člověkem). *Quaternary Science Reviews* 20:1769-1777.
- Rutherford, S., M.E. Mann, T.J. Osborn, R.S. Bradley, K.R. Briffa, M.K. Hughes a P.D. Jones. 2005. Proxy-based Northern Hemisphere surface temperature reconstructions: sensitivity to method, predictor network, target season, and target domain [Rekonstrukce povrchové teploty severní polokoule na základě proxy: citlivost na metodu, predikční síť, cílové období a cílovou oblast]. *Journal of Climate* 18:2308-2329.
- Santer, B.D., K.E. Taylor, T.M.L. Wigley, J.E. Penner, P.D. Jones a U. Cubasch. 1995. Towards the detection and attribution of an anthropogenic effect on climate (K odhalování a přisuzování antropogenního vlivu na klima). *Climate Dynamics* 12(2):77-100.
- Sapiano, J.J., W.D. Harrison, K.A. Echelmeyer. 1998. Výškové, objemové a terminální změny devíti ledovců v Severní Americe. *Journal of Glaciology* 44(146):119-135.
- Schweingruber, F.H. 1988. *Tree Rings: F.: Dendrochronology: Basics and Applications of Dendrochronology*. D. Reidel Publishing Co., Dordrecht, Holland.
- Scuderi, L.A., C.B. Schaaf, K.U. Orth a L.E. Band. 1993. Alpine treeline growth variability: simulation using an ecosystem process model (Proměnlivost růstu alpských stromů: simulace pomocí modelu ekosystémových procesů). *Arctic and Alpine Research* 25(3):175-182.
- Shen, G.T., J.E. Cole, D.W. Lea, L.J. Linn, T.A. McConnaughey a R.G. Fairbanks. 1992. Surface ocean variability at Galapagos from 1936-1982: calibration of geochemical tracers in corals (Proměnlivost povrchového oceánu na Galapágách v letech 1936-1982: kalibrace geochemických stop v korálech). *Paleoceanography* 7:563-588.
- Shen, S.S.P., G.R. North a K.-Y. Kim. 1994. Spektrální přístup k optimálnímu odhadu globální průměrné teploty. *Journal of Climate* 7:1999-2007.
- Shindell, D.T., G.A. Schmidt, M.E. Mann, D. Rind a A. Waple. 2001. Solar forcing of regional climate change during the Maunder Minimum (Sluneční vliv na regionální změny klimatu během Maunderova minima). *Science* 294:2149-2152.
- Shindell, D.T., G.A. Schmidt, R. Miller a M.E. Mann. 2003. Volcanic and solar forcing of climate change during the pre-industrial era (Vulkanické a sluneční působení na změny klimatu v předindustriální éře). *Journal of Climate* 16:4094-4107.
- Siegenthaler, U., T.F. Stocker, E. Monnin, D. Lüthi, J. Schwander, B. Stauffer, D. Raynaud, J.-M. Barnola, H. Fischer, V. Masson-Delmotte a J. Jouzel. 2005a. Stablní vztah mezi cyklem uhlíku a klimatem během posledního pleistocénu. *Science* 310(5752):1313-1317.

Siegenthaler, U., E. Monnin, K. Kawamura, R. Spahni, J. Schwander, B. Stauffer, T.F. Stocker, J.-M. Barnola a H. Fischer. 2005b. Podpůrné důkazy z ledového jádra EPICA Dronning Maud Land o změnách atmosférického CO_2 během posledního tisíciletí. *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorologie* 57:51-57.

- Skinner, W.R. a J.A. Majorowicz. 1999. Regionální klimatické oteplování a související změny půdního pokryvu ve dvacátém století v severozápadní části Severní Ameriky. *Climate Research* 12:39-52.
- Smerdon, J.E., H.N. Pollack, V. Cermak, J.W. Enz, M. Kresl, J. Safanda a J.F. Wehmler. 2004. Air- ground temperature coupling and subsurface propagation of annual temperature signals [Vazba mezi teplotou vzduchu a půdy a podpovrchové šíření ročních teplotních signálů]. *Journal of Geophysical Research* 109(D21):D21107.
- Smith, T.M. a R.W. Reynolds. 2005. Globální sloučená rekonstrukce teploty povrchu pevniny a moře na základě historických pozorování (1880-1997). *Journal of Climate* 18:2021-2036.
- Spahni, R., J. Chappellaz, T.F. Stocker, L. Loulergue, G. Hausammann, K. Kawamura, J. Flückiger, J. Schwander, D. Raynaud, V. Masson-Delmotte a J. Jouzel. 2005. Atmosférický metan a oxid dusný pozdního pleistocénu z antarktických ledových jader. *Science* 310(5752):1317-1321.
- Stauffer, B., G. Fischer, A. Neftel a H. Oeschger. 1985. Nárůst atmosférického metanu zaznamenaný v antarktickém ledovém jádře. *Science* 229:1386-1388.
- Steig, E.J., D.L. Morse, E.D. Waddington, M. Stuiver, P.M. Grootes, P.A. Mayewski, M.S. Twickler a S.I. Whitlow. 2000. Wisconsinan and Holocene climate history from an ice core at Taylor Dome, Western Ross Embayment, Antarctica (Wisconsinská a holocénní historie klimatu z ledového jádra v Taylor Dome, Západní Rossova zátoka, Antarktida). *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography* 82(2-3):213.
- Stokes, M.A. a T.L. Smiley. 1996. *An Introduction to Tree-Ring Dating*. University of Arizona Press, Tucson.
- Stott, P.A., S.F.B. Tett, G.S. Jones, M.R. Allen, J.F.B. Mitchell a G.J. Jenkins. 2000. External control of 20th century temperature by natural and anthropogenic forcing (Vnější ovlivňování teploty ve 20. století přírodními a antropogenními vlivy). *Science* 290:2133-2137.
- Swart, P.K., R.E. Dodge a H.J. Hudson. 1996. Stabilní izotopický záznam kyslíku a uhlíku u korálu z jižní Floridy za 240 let; důsledky pro předpověď srážek na jižní Floridě. *Palaios* 11(4):362-375.
- Tang, K., X. Feng a G.S. Funkhouser. 1999. $\Delta^{13}C$ letokruhů stromů s plnou kůrou a pruhovanou kůrou štětín. šišky v Bílých horách v Kalifornii. *Global Change Biology* 5:33-40.
- Tardif, J. a Y. Bergeron. 1997. Srovnávací dendroklimatologická analýza dvou populací jasanu černého a dvou populací cedru bílého z kontrastních lokalit v oblasti jezera Duparquet v severozápadním Quebecu. *Canadian Journal of Forest Research* 27(1):108-116.
- Tardif, J., J.J. Camarero, M. Ribas a E. Gutiérrez. 2003. Spatiotemporal variability in tree growth in the central Pyrenees: climatic and site influences (Časoprostorová proměnlivost růstu stromů v centrálních Pyrenejích: klimatické a stanovištní vlivy). *Ecological Monographs* 73(2):241-257.
- Thompson, L.G. a M.E. Davis. 2005. Stabilní izotopy v průběhu holocénu zaznamenané v ledových jádrech v nízkých nadmořských výškách. In: *Isotopes in the Water Cycle: Minulost, současnost a budoucnost rozvíjející se vědy*. Pp. 321-339. P.K. Aggrwal, J.R. Gat a K.F.O. Froehlich (eds.). Springer, Dordrecht, Nizozemsko.
- Thompson, L.G., E. Mosley-Thompson, W. Dansgaard, P.M. Grootes. 1986. The Little Ice Age as recorded in the stratigraphy of the tropical Quelccaya ice cap. *Science* 234(4774):361-364.
- Thompson, L., E. Mosley-Thompson, M.E. Davis, J.F. Bolzan, T. Yao, N. Gundestrup, X. Wu, L. Klein a Z. Xie. 1989. 100 000 years climate record from Qinghai-Tibetan Plateau ice cores [Záznamy klimatu za 100 000 let z ledových jader Čching-chajsko-tibetské plošiny]. *Science* 246:474-477.
- Thompson, L.G., E. Mosley-Thompson, M.E. Davis, P.-N. Lin, K.A. Henderson, J. Cole-Dai, J.F. Bolzan a K.-B. Liu. 1995. Late glacial stage and Holocene tropical ice core records from Huascarán, Peru (Záznamy z tropických ledových jader z Huascaránu, Peru). *Science* 269(5220):46-50.
- Thompson, L.G., T. Yao, M.E. Davis, K.A. Henderson, E. Mosley-Thompson, P.-N. Lin, J. Beer, H.-A. Synal, J. Cole-Dai a J.F. Bolzan. 1997. Tropická klimatická nestabilita: poslední glaciální cyklus z čchinghajsko-tibetského ledového jádra. *Science* 276(5320):1821-1825.
- Thompson, L.G., M.E. Davis, E. Mosley-Thompson, T.A. Sowers, K.A. Henderson, V.S. Zagorodnov, P.-N. Lin, V.N. Michalenko, R.K. Campen, J.F. Bolzan, J. Cole-Dai a B. Francou. 1998. A 25,000-year tropical climate history from Bolivian ice cores [Historie tropického klimatu za 25 000 let z bolivijských ledových jader]. *Science* 282(5395):1858-1864.
- Thompson, L.G., T. Yao, E. Mosley-Thompson, M.E. Davis, K.A. Henderson a P.N. Lin. 2000a. A high-resolution millennial record of the South Asian Monsoon from Himalayan ice cores (Tisíciletý záznam jihoasijského monzunu z himálajských ledových jader s vysokým rozlišením). *Science* 289(5486):1916-1919.
- Thompson, L.G., E. Mosley-Thompson a K.A. Henderson. 2000b. Ice-core palaeoclimate records in tropical South America since the Last Glacial Maximum. *Journal of Quaternary Science* 15(4): 377-394.
- Thompson, L.G., E. Mosley-Thompson, M.E. Davis, K.A. Henderson, H.H. Brecher, V.S. Zagorodnov, T.A. Mashiotta, P.N. Lin, V.N. Michalenko, D.R. Hardy a J. Beer. 2002. Kilimanjaro ice core records: evidence of Holocene climate change in tropical Africa (Záznamy z ledových jader Kilimandžára:

důkaz holocenních klimatických změn v tropické Africe). *Science* 298(5593):589-593.

- Thompson, L., E. Mosley-Thompson, M.E. Davis, P.-N. Lin, K. Henderson a T.A. Mashiotta. 2003. Tropické ledovce a ledová jádra jako důkaz klimatických změn v ročním až tisíciletém měřítku. *Climatic Change* 59(1-2):137-155.
- Thompson, L.G., E. Mosley-Thompson, H. Brecher, M. Davis, B. León, D. Les, P.-N. Lin, T. Mashiotta a K. Mountain. 2006. Náhlá změna tropického klimatu: minulost a současnost. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 103(28):10,536-10,543.
- Thompson, L.G., T. Yao, M.E. Davis, E. Mosley-Thompson, P.-N. Lin, T.A. Mashiotta, V.N. Mikhailenko a V.S. Zagorodnov. V tisku. Holocénní klimatická variabilita archivovaná v ledovci Puruogangri z centrální Tibetské náhorní plošiny. *Annals of Glaciology* 43.
- Tian, L., T. Yao, P.F. Schuster, J.W.C. White, K. Ichiyanagi, E. Pendall, J. Pu a W. Yu. 2003. Koncentrace kyslíku- 18 v recentních srážkách a ledových jádrech na Tibetské náhorní plošině. *Journal of Geophysical Research* 108(D9): Art. No. 4293.
- Trenberth, K.E. a B.L. Otto-Bliesner. 2003. Na cestě k integrované rekonstrukci minulého klimatu. *Science* 300:589-591.
- Trotter, R.T.I., N.S. Cobb a T.G. Whitham. 2002. Herbivorie, odolnost rostlin a klima v záznamu letokruhů stromů: interakce zkrusují klimatické rekonstrukce. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 99(15):10197-10202.
- Turekian, K.K., J.K. Cochran a D.J. DeMaster. 1978. Bioturbation in deep-sea deposits: rates and consequences (Bioturbace v hlubokomořských usazeninách: rychlost a důsledky). *Oceanus* 21(1):34-41.
- Urban, F.E., J.E. Cole a J.T. Overpeck. 2000. Modifikace proměnlivosti tropického Pacifiku jeho středním stavem odvozená ze 155letého korálového záznamu. *Nature* 407:989-993.
- Vaganov, E.A., M.K. Hughes, A.V. Kiryanov, F.H. Schweingruber a P.P. Silkin. 1999. Influence of snowfall and melt timing on tree growth in subarctic Eurasia [Vliv sněhových srážek a načasování tání na růst stromů v subarktické Eurasii]. *Nature* 400:149-151.
- Vaganov, E.A., M.K. Hughes a A.V. Shashkin. 2006. *Dynamika růstu letokruhů jehličnatých stromů: Rings: Images of Past and Future Environments (Obrazy minulého a budoucího prostředí)*. Springer, New York.
- van den Broeke, M. 2005. Silné povrchové tání předcházelo kolapsu ledového šelfu Antarktického poloostrova. *Geo-physical Research Letters* 32:L12815.
- Van der Veen, C.J. 1999. *Fundamentals of Glacier Dynamics*. A.A. Balkema, Leiden, Nizozemsko. van Engelen, A.F.V., J. Buisman a F. Ijnsen. 2001. Tisíciletí počasí, větrů a vody v nížinách. země. In: *Historie a klima: Vzpomínky na budoucnost?* Pp. 101-124. P.D. Jones, A.E.J. Ogilvie, T.D. Davies a K.R. Briffa (eds.). Kluwer Academic / Plenum Publishers, New York.
- Vaughan, D.G. a C.S.M. Doake. 1996. Nedávné oteplování atmosféry a ústup ledových šelfů na Antarktickém poloostrově. *Nature* 379(6563):328-331.
- Verschuren, D., K.R. Laird a B.F. Cumming. 2000. Srážky a sucho v rovníkové východní Africe za posledních 1 100 let. *Nature* 403(6768):410-414.
- Villalba, R., T.T. Veblen a J. Ogden. 1994. Climatic influences on the growth of subalpine trees in the Colorado Front Range [Klimatické vlivy na růst subalpínských dřevin v oblasti Colorado Front Range]. *Ecology* 75(5):1450-1462.
- Vitousek, P.M., J.D. Aber, R.W. Howarth, G.E. Likens, P.A. Matson, D.W. Schindler, W.H. Schlesinger a D.G. Tilman. 1997. Technical report: Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences (Technická zpráva: Změny globálního cyklu dusíku způsobené člověkem: zdroje a důsledky). *Ecological Applications* 7(2):737-750.
- von Rad, U., M. Schaaf, K.H. Michels, H. Schulz, W.H. Berger a F. Sirocko. 1999. A 5000 yr record of climate change in varved sediments from the oxygen minimum zone off Pakistan, Northeastern Arabian Sea [Záznam 5000 let klimatických změn ve varvaných sedimentech ze zóny kyslíkového minima u Pákistánu v severovýchodní části Arabského moře]. *Quaternary Research* 51:39-53.
- von Storch, H., E. Zorita, J. Jones, Y. Dimitriev, F. Gonzalez-Rouco a S. Tett. 2004. Rekonstrukce minulého klimatu ze zašuměných dat. *Science* 306:679-682.
- von Storch, H., E. Zorita, J.M. Jones, F. Gonzalez-Rouco a S.F.B. Tett. 2006. Odpověď na komentář k článku "Reconstructing past climate from noisy data". *Science* 312:529c.
- Vuille, M., R.S. Bradley, R. Healy, M. Werner, D.R. Hardy, L.G. Thompson a F. Keimig. 2003a. Modelování $\Delta^{18}O$ ve srážkách nad tropickou Amerikou: 2. Simulace signálu stabilních izotopů v andských ledových jádrech. *Journal of Geophysical Research* 108(D6): Art. No. 4175.
- Vuille, M., R.S. Bradley, M. Werner a F. Keimig. 2003b. Změna klimatu ve 20. století v tropických Andách: pozorování a výsledky modelů. *Climatic Change* 59(1-2):75-99.
- Wahl, E.R. a C.M. Ammann. V tisku. Robustness of the Mann, Bradley, Hughes reconstruction of Northern Hemisphere surface temperatures: examination of criticisms based on the nature and processing of proxy climate evidence. *Climatic Change*.

Wahl, E.R., D.M. Ritson a C.M. Ammann. 2006. Comment on "Reconstructing past climate from noisy data" (Rekonstrukce minulého klimatu ze zašuměných dat). *Science* 312:529b.

- Wang, S., D. Gong a J. Zhu. 2001. Klimatické oteplování v Číně ve dvacátém století v kontextu holocénu. *Holocene* 11(3):313-321.
- Wang, L., S. Payette a Y. Bégin. 2002. Vztahy mezi anatomickými a denzitometrickými charakteristikami smrku černého a letní teplotou na hranici stromů v severním Quebecu. *Canadian Journal of Forest Research* 32:477-486.
- Wang, Y.-M., J.L. Lean a N.R. Sheeley. 2005a. Modelování magnetického pole a ozáření Slunce od roku 1713. *Astrophysical Journal* 625:522-538.
- Wang, Y., H. Cheng, R.L. Edwards, Y. He, X. Kong, Z. An, J. Wu, M.J. Kelly, C.A. Dykoski a X. Li. 2005b. The Holocene Asian Monsoon: Links to solar changes and North Atlantic climate (Asijský monzun v holocénu: vazby na sluneční změny a severoatlantické klima). *Science* 308:854-857.
- Warren, C. a M. Aniya. 1999. The calving glaciers of southern South America (Tání ledovců v jižní Americe). *Global and Planetary Change* 22(1-4):59-77.
- Webb, G.E. 1983. *Tree Rings and Telescopes: Douglassse*. University of Arizona Press, Tucson.
- Webb, M.J., C.A. Senior, D.M.H. Sexton, W.J. Ingram, K.D. Williams, M.A. Ringer, B.J. McAvaney, R. Colman, B.J. Soden, R. Gudgel, T. Knutson, S. Emori, T. Ogura, Y. Tsushima, N. Andronova, B. Li, I. Musat, S. Bony a K.E. Taylor. 2006. On the contribution of local feedback mechanisms to the range of climate sensitivity in two GCM ensembles [O podílu lokálních mechanismů zpětné vazby na rozsahu citlivosti klimatu ve dvou souborech GCM]. *Climate Dynamics* 27:17-38.
- Wigley, T.M.L., K.R. Briffa a P.D. Jones. 1984. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology (O průměrné hodnotě korelovaných časových řad s aplikacemi v dendroklimatologii a hydrometeorologii). *Journal of Climate and Applied Meteorology* 23:201-213.
- Wigley, T.M.L., P.D. Jones a K.R. Briffa. 1987. Cross-dating methods in dendrochronology (Metody křížového datování v dendrochronologii). *Journal of Archaeological Science* 14:51-64.
- Wilmking, M. a G.P. Juday. 2005. Longitudinal variation of radial growth at Alaska's northern treeline - recent changes and possible scenarios for the 21st century (Podélná variabilita radiálního růstu na severním stromořadí Aljašky - nedávné změny a možné scénáře pro 21. století). *Global and Planetary Change* 47:282-300.
- Winter, A, H. Ishioroshi, T. Watanabe, T. Oba a J. Christy. 2000. Teplota povrchu moří v Karibiku: o dva až tři stupně nižší než v současnosti během malé doby ledové. *Geophysical Research Letters*. 27(20):3365-3368.
- Winton, M. 2006. Odhady zpětné vazby povrchového albeda pro klimatické modely AR4. *Journal of Climate* 19:359-365.
- Wohlforth, C.P. 2004. *Velryba a superpočítač: Na severní frontě klimatických změn*. North Point Press, New York.
- Xoplaki, E., J. Luterbacher, H. Paeth, D. Dietrich, N. Steiner, M. Grosjean a H. Wanner. 2005. Euro-pean spring and autumn temperature variability and change of extremes over the last half millennium. *Geophysical Research Letters* 32:L15713.
- Yamaguchi, D.K. 1991. Jednoduchá metoda křížového datování přírůstkových jader živých stromů. *Canadian Journal of Forest Research* 21(3):414-416.
- Yang, B., A. Braeuning a K.R. Johnson. 2002. Obecné charakteristiky kolísání teplot v Číně v posledních dvou tisíciletích. *Geophysical Research Letters* 29(9):1324.
- Yao, T., L.G. Thompson, E. Mosley-Thompson, Y. Zhihong, Z. Xingping, P.-N. Lin. 1996. Klimatologický význam $\Delta 18O$ v severotibetských ledových jádrech. *Journal of Geophysical Research* 101(D23):29,531- 29,537.
- Zinke, J., W.-C. Dullo, G.A. Heiss a A. Eisenhauer. 2004. ENSO a subtropická dipólová variabilita Indického oceánu je zaznamenána v korálovém záznamu u jihozápadního Madagaskaru za období 1659-1995. *Earth and Planetary Science Letters* 228(1-2):177-194.
- Zolitschka, B. 2003. Datování na základě sladkovodních a mořských vrstevnatých sedimentů. In: *Global Change in the Holocene*. Pp. 92-106. A. Mackay et al. (eds.). Arnold, London.
- Zorita, E. a H. von Storch. 2005. Metodické aspekty rekonstrukce nelokálních historických teplot. *Memorie della Società Astronomica Italia* 76:794-801.
- Zuo, Z. a J. Oerlemans. 1997. Contribution of glacier melt to sea level rise since AD 1865: a regionally differentiated calculation (Příspěvek tání ledovců ke zvýšení hladiny moře od roku 1865: regionálně diferencovaný výpočet). *Climate Dynamics* 13(12):835-845.

Přílohy

A

Prohlášení o úkolu

Výbor popíše a zhodnotí stav vědeckého úsilí o rekonstrukci záznamů povrchových teplot na Zemi za posledních přibližně 2 000 let. Výbor shrne současné vědecké informace o teplotních záznamech za poslední dvě tisíciletí, popíše hlavní oblasti nejistoty a jejich význam, popíše hlavní používané metodiky a případné problémy s těmito přístupy a vysvětlí, jak zásadní význam má debata o paleoklimatických teplotních záznamech pro stav vědeckých poznatků o globální změně klimatu. V rámci tohoto úsilí se výbor bude zabývat úkoly, jako např.:

- Popište proxy záznamy, které byly použity k odhadu povrchových teplot v období před příchodem astronomie (např. letokruhy stromů, jádra sedimentů, izotopy ve vodě a ledu, biologické indikátory, indikátory z korálových útvarů, geologické vrty, historické údaje), a zhodnoťte jejich omezení.
- Diskutujte o tom, jak lze proxy data použít k rekonstrukci povrchové teploty v různých zeměpisných oblastech a časových obdobích.
- Posoudit různé metody používané ke kombinaci více proxy dat pro vytvoření velkoplošných rekonstrukcí povrchové teploty, hlavní předpoklady spojené s každým přístupem a nejistoty spojené s těmito metodikami.
- Vyjádřete se k celkové přesnosti a preciznosti těchto rekonstrukcí, k příslušným otázkám kvality dat a přístupu k nim a k budoucím výzvám výzkumu.

B

Kód R pro obrázek 9-2

```
n <- 600;
základní hodnota <- n
- 0:99; phi <- 0,9;

HSIndex <- function(x)
{
  (mean(x[baseline]) - mean(x)) / sqrt(var(x));
}

SimulatePC1 <- function(p = 50)
{
  a <- matrix(NA, n, p);
  for (j in 1:p) {
    b <- arima.sim(model = list(ar = phi), n);
    a[, j] <- b - mean(b[baseline]);
  }
  invisible(svd(a)$u[,1]);
}

a <- matrix(NA, n, 5);
for (j in 1:ncol(a)) {
  a[, j] <- SimulatePC1();
}

b <- apply(a, 2, HSIndex);
c <- t(sign(b) * t(a));
matplot(c, type = "l", xlab = "", ylab = "", lty = 2);
```

```
PopulationCov <- function(n)
{
  a <- matrix(NA, n, n);
  a[] <- phi^abs(row(a) - col(a));
  for (i in 1:n)
  a[i, ] <- a[i, ] - mean(a[i, baseline]);
  for (j in 1:n)
  a[, j] <- a[, j] - mean(a[baseline, j]);
  invisible(a);
}

e <- eigen(PopulationCov(n));
lines(e$vector[,1], col = 2, lwd = 2);
```


C

Životopisy členů výboru

Gerald R. North (*předseda*) je zasloužilým profesorem meteorologie a oceánografie a držitelem Harold J. Haynes Endowed Chair in Geosciences na Texas A&M University. Mezi jeho odborné zájmy patří analýza klimatu, klimatické a hydrologické modelování, satelitní dálkový průzkum a plánování misí a statistické metody v atmosférických vědách. Dr. North a jeho výzkumná skupina se zajímají o klimatické změny a určení jejich původu. Pracují se zjednodušenými klimatickými modely, které se hodí k analytickému studiu, s teorií odhadů aplikovanou na pozorovací systémy a s testováním všech klimatických modelů pomocí statistických přístupů. Dr. North je členem Americké asociace pro rozvoj vědy (AAAS), Americké meteorologické společnosti (AMS) a Americké geofyzikální unie (AGU) a je šéfredaktorem časopisu *Reviews of Geophysics*. Je bývalým členem výboru Národní rady pro výzkum (NRC) pro atmosférické vědy a klima a výboru pro studium Země. Dr. North získal doktorát z fyziky na Wisconsinské univerzitě.

Franco Biondi je docentem fyzické geografie na Nevadské univerzitě v Renu, kde je také členem postgraduálního programu hydrologických věd a doktorského programu ekologie, evoluce a biologie ochrany přírody. Zabývá se dynamikou klimatu a lesů, holocenními procesy a změnami životního prostředí. Jeho dlouhodobým vědeckým cílem je porozumět klimatickým procesům ovlivňujícím růst lesů ve víceletém časovém měřítku v současném, minulém a budoucím prostředí a tento cíl sleduje pomocí přírodních archivů, jako jsou letokruhy stromů. V roce 2001 obdržel cenu za práci roku od odborné skupiny Climate Specialty Group při Asociaci amerických geografů. Dr. Biondi získal doktorát v oboru management vodních ploch na Arizonské univerzitě v Tucsonu.

Peter Bloomfield je profesorem statistiky a členem katedry finanční matematiky na North Carolina State University v Raleighu. Zabývá se aplikací statistických metod na problémy v oblasti věd o Zemi a financí. Působil v Národním

Aeronautics and Space Administration/World Meteorological Organization (NASA/WMO) a byl hlavním autorem přílohy o statistikách pro zprávu tohoto panelu. Působil také v panelech NRC, Agentury pro ochranu životního prostředí (EPA), NASA a Mezivládního panelu pro změnu klimatu (IPCC). Studoval metody pro zjišťování trendů v geofyzikálních časových řadách, jako je stratosférický ozon, povrchové teploty a koncentrace chlorfluoruhlodíků (CFC) v atmosféře. Dr. Bloomfield také několik let pracoval ve finanční instituci, kde vytvářel statistický model rizik v účelových finančních společnostech, a nadále se věnuje konzultacím v oblasti finančních problémů. Doktorát ze statistiky získal na Londýnské univerzitě.

John R. Christy je profesorem atmosférických věd a ředitelem Centra pro vědu o zemském systému na Alabamské univerzitě v Huntsville, kde se od roku 1987 věnuje studiu globálních klimatických problémů. V roce 2000 byl jmenován státním klimatologem státu Alabama. V roce 1989 Dr. Roy Spencer (tehdy vědecký pracovník NASA/Marshall) a Dr. Christy vytvořili soubor dat o globální teplotě z mikrovlnných dat pozorovaných z družic počínaje rokem 1979, za což jim byla udělena medaile NASA za výjimečné vědecké úspěchy. Obdrželi také zvláštní cenu AMS "za vytvoření globálního, přesného záznamu teploty Země z operačních polárních družic, což zásadně posunulo naši schopnost monitorovat klima". Dr. Christy se podílel na zprávách IPCC, do nichž byly teploty z družic zahrnuty jako vysoce kvalitní soubor dat pro studium globálních změn klimatu, a byl jejich hlavním autorem. Je bývalým členem několika výborů NRC, včetně panelu pro sladění teplotních pozorování a výboru pro využití dat z družicového průzkumu životního prostředí. Dr. Christy získal doktorát z atmosférických věd na Illinoiské univerzitě.

Kurt M. Cuffey je profesorem geografie na Kalifornské univerzitě v Berkeley. Dr. Cuffey zkoumá rozhraní mezi klimatologií a geomorfologií a zajímá se zejména o velké zemské ledovce. Jeho výzkumné úsilí klade důraz na environmentální změny polárních oblastí se zaměřením na glaciologické problémy. Využívá geofyzikální techniky k rekonstrukci historie teplot a rychlosti sněžení nad ledovými příkrovy. Pracuje také na lepším pochopení fyzikálních a chemických procesů, které určují složení ledu v závislosti na klimatu. Dr. Cuffey byl průkopníkem v používání vrtné termometrie k získání teplotní kalibrace záznamu izotopů kyslíku v ledových jádrech z vrcholové části Grónska. Je členem AGU a v roce 2003 mu byla udělena Macelwaneova medaile AGU. Dr. Cuffey získal doktorát na Washingtonské univerzitě.

Robert E. Dickinson je profesorem na School of Earth and Atmospheric Sciences na Georgia Institute of Technology. Mezi oblasti jeho zájmu patří dynamika atmosférických planetárních vln, dynamika stratosféry, modely globální struktury a dynamiky terestrické a planetární termosféry, nelokální termodynamická rovnováha infračerveného přenosu záření v planetárních mezoférách, modelování globálního klimatu a procesů, role pozemních procesů v klimatických systémech, modelování role vegetace v regionální evapotranspiraci a role tropických lesů v klimatických systémech. Dr. Dickinson je členem Národní akademie věd (NAS) a Národní akademie inženýrství (NAE) a členem AAAS a AGU. Byl členem

mnoha výborů NRC, včetně Výboru pro vědu o změně klimatu a Výboru pro výzkum klimatu. Je držitelem Rossbyho ceny AMS a Revelleovy medaile AGU. Dr. Dickinson získal doktorát z meteorologie na Massachusettském technologickém institutu.

Ellen R.M. Druffelová je vedoucí katedry a profesorkou věd o zemském systému na Kalifornské univerzitě v Irvine. Mezi její výzkumné zájmy patří vazba mezi klimatem a ventilací oceánu a jejich vliv na globální koloběh oxidu uhličitého a sledování vlivu klimatických změn na současnou a minulou cirkulaci horních vrstev oceánu pomocí izotopových studií každoročně páskovaných korálů. Dr. Druffelová je členkou AAAS a AGU; je prezidentkou sekce oceánských věd AGU. Je členkou několika výborů NRC, včetně výboru pro studium oceánů a výboru pro oceánský uhlík. Doktorát z chemie získala na Kalifornské univerzitě v San Diegu.

Douglas Nychka je vedoucím vědeckým pracovníkem Národního centra pro výzkum atmosféry (NCAR). Před nástupem do NCAR působil 14 let na katedře statistiky na Severokarolínské státní univerzitě. Ve své současné funkci se zabývá především interdisciplinárním výzkumem a přenášením statistických technik na důležité vědecké problémy a využíváním těchto problémů k motivaci nového statistického výzkumu. Mezi jeho osobní výzkumné zájmy patří neparametrická regrese, statistické výpočty, prostorová statistika a prostorové návrhy. Dr. Nychka je v současné době členem výboru NRC pro aplikovanou a teoretickou statistiku. Doktorát získal na Wisconsinské univerzitě.

Bette Otto-Bliesnerová je vědeckou pracovnící v oddělení klimatu a globální dynamiky v NCAR v Boulderu v Coloradu. Je vedoucí skupiny pro paleoklima a zástupkyní vedoucího sekce pro výzkum klimatických změn. Jejím výzkumným zájmem je využití modelů klimatických systémů ke zkoumání klimatu v minulosti a jeho proměnlivosti v široké škále časových měřítek. Zajímá se zejména o rozsah a způsoby proměnlivosti klimatu vynucené přirozenou cestou (vnitřně generované, vulkanické epizody, sluneční změny, skleníkové plyny) za posledních 1 000 let a přesahující holocén do posledního glaciálního maxima (21 000 let před současností). Dr. Otto-Bliesner je předsedou AGU Paleooceanography and Paleoclimatology Focus Group a členem vědeckých řídicích výborů programu Past Global Changes (PAGES) Mezinárodního programu pro geosféru a biosféru a Paleoclimate Modeling Intercomparison Project (PMIP). V současné době také působí jako hlavní autorka čtvrté hodnotící zprávy IPCC. Doktorát z meteorologie získala na Wisconsinské univerzitě v Madisonu.

Neil Roberts je vedoucím geografické fakulty na Plymouthské univerzitě. Jeho hlavním výzkumným zájmem jsou holocenní změny životního prostředí, zejména záznamy jezerních sedimentů o klimatu a vlivu člověka v oblastech s nízkou zeměpisnou šířkou, jako je východní Afrika a Středomoří. Dr. Roberts je členem Královské geografické společnosti a členem Britské geomorfologické výzkumné skupiny, Britské ekologické společnosti a Americké kvartérní asociace. Je autorem knihy *The Holocene: An Environmental History*. Dr. Roberts získal doktorát na University College London.

Karl K. Turekian je Sterlingův profesor geologie a geofyziky na Yaleově univerzitě. Mezi jeho výzkumné oblasti patří atmosférická geochemie kosmogenních, radonových dceřiných a umělých radionuklidů, povrchová a podzemní geochemie radionuklidů, mořská geochemie a studium historie Země pomocí radiogenních izotopů. Dr. Turekian je členem NAS a členem AAAS a AGU. Je držitelem medaile Maurice Ewinga AGU, Goldschmidtovy medaile Geochemické společnosti a Wollastonovy medaile Londýnské geologické společnosti. Dr. Turekian působil v mnoha výborech NRC, včetně Výboru pro atmosférický rozptyl úniků nebezpečných látek, Výboru pro metriky výzkumu globálních změn, Výboru pro vědu a technologie v oblasti vody a Výboru pro oceánské studie. Dr. Turekian získal doktorát z geochemie na Kolumbijské univerzitě.

John M. Wallace je profesorem atmosférických věd a ředitelem Společného ústavu pro studium atmosféry a oceánu (JISAO) na Washingtonské univerzitě v Seattlu. Jeho výzkum a výzkum jeho studentů je zaměřen na zlepšení našeho porozumění globálnímu klimatu a jeho meziročním a desetiletým výkyvům s využitím pozorovacích dat. Podíleli se na zdokumentování existence proměnlivosti podobné El Niño v časovém měřítku od desetiletí k desetiletí (např. pacifická dekadická oscilace) a v současné době zkoumají dva analogické vzorce proměnlivosti počasí a klimatu - "prstencovité módy" na severní a jižní polokouli, které hrály významnou roli v klimatických trendech posledních 30 let. Dr. Wallace je členem NAS a členem AAAS, AGU a AMS. Byl členem mnoha výborů NRC, včetně Výboru pro vědu o klimatických změnách, panelu pro sladění teplotních pozorování a Výboru pro výzkum klimatu, a v současné době je členem Výboru pro strategické pokyny NSF pro podporu atmosférických věd. Doktorát získal na Massachusettském technologickém institutu.

