

**CO<sub>2</sub> NA HOUPAČCE**

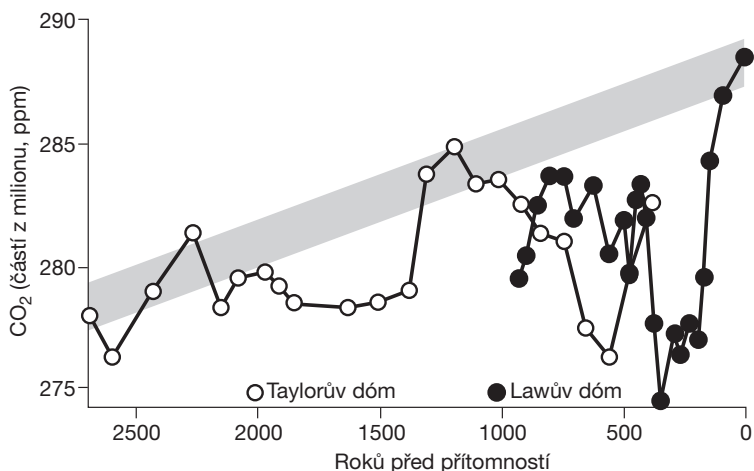
Většina povrchu antarktického ledovce je polární poušť, kde ročně napadne jen něco málo přes dva centimetry sněhu, takže jde o polární období aridního centra Sahary. Ledová jádra z těchto oblastí nemají takové rozlišení, aby nám odhalily jakékoliv krátkodobé odchylky CO<sub>2</sub> a dalších plynných či pevných složek přítomných po stovky či jen desítky let. Avšak podél okrajů antarktického ledovce napadá sněhu více a na příhodně chráněných místech jej silný vítr hromadí do vysokých závějí. A právě z těchto míst lze získat detailnější záznamy. Dvě takové lokality na antarktickém kontinentu poskytly záznamy s vysokým rozlišením, které pokrývají období posledních 2500 let; jsou znázorněny na obrázku 12.1.

Šedá plocha představuje projekci dlouhodobého nárůstu CO<sub>2</sub> za posledních 8000 let, který připisují lidské činnosti. Krátce po začátku našeho letopočtu se tento vzestupný trend zpomalil a poté několikrát přerušil poklesy CO<sub>2</sub>. Dvě ledová jádra promítnutá do obrázku 12.1. se místy neshodují, nicméně ukazují na dva, možná i tři propady CO<sub>2</sub> na minimum: jeden poměrně dlouhý, ne však příliš hluboký propad trvajícím přibližně od roku 200 do roku 600 n. l.; druhý kratší propad v letech 1300–1400; a třetí propad, hluboký i dlouhý, z let 1500–1750.

Jedním z důvodů, proč se hodnoty CO<sub>2</sub> v oblasti překrývání obou jader neshodují, je chyba v datování. Z obou použitých záznamů je ten z Lawova dómu směrodatnější: obsahuje vrstvy s částčkami velmi jemného popela usazeného při vulkanických erupcích se známým časovým zařazením. K ukládání u něho navíc docházelo rychlejším tempem než v případě Taylorova dómu. Tak či onak, oba záznamy se shodují v jedné velmi důležité věci: v posledních 2000 letech docházelo k negativním výkyvům koncentrace CO<sub>2</sub> v atmosféře o 40 až 10 ppm. Procesy odehrávající se v ledu mohou původní záznam CO<sub>2</sub> poněkud „učesat“ a zmírnit

amplitudu výkyvů, nicméně by bylo obtížné zaznamenat negativní výkyvy, kdyby ve skutečnosti k žádným nedošlo.

Co mohlo tyto poklesy způsobit? Prvním vysvětlením, které se nabízí, je návaznost na přirozené klimatické změny. K nejzajímavějším momentům klimatologického výzkumu poslední dekády patří objev náhlých výkyvů, které trvají pouhé desítky, stovky či tisíce let, což jsou samozřejmě o dost kratší časové úseky, než na jakých dochází k orbitálním změnám. Tyto krátkodobé výkyvy musely mít po většinu historie Země a jejích ledových dob nějaké přirozené příčiny, protože k nim docházelo dávno před nástupem možného antropogenního vlivu na klima. V dobách výskytu kontinentálních ledovců byly tyto výkyvy značné: krátkodobé změny teplot v Grónsku a severním Atlantiku odpovídají zhruba třetině rozdílu mezi klimatem vrcholného glaciálu a vrcholného interglaciálu. V době těchto výkyvů se z okrajů ledovců odlamoval bezpočet ledových ker, které odplouvaly do Atlantiku a ukládaly obrovské množství úlomků hornin a nerostů do mořských usazenin.



**Obr. 12.1** Ledová jádra z Antarktidy ukazují nápadné poklesy hodnot CO<sub>2</sub> během posledních 2000 let na pozadí dlouhodobého trendu (šedá plocha)

Tyto relativně krátké výkyvy se překrývají s pomalejšími, dlouhodobými klimatickými změnami odehrávajícími se v orbitálních cyklech a podle všeho jsou důsledkem zcela jiného fenoménu, který se dosud nepodařilo zcela objasnit. Představte si to na základě analogie s něčím, co znáte. Denní teplota je ovlivňována přímo Sluncem: největší teplo panuje pozdě odpoledne, největší chlad zase za svítání. K těmto změnám dochází každý den v předvídatelném cyklu. Avšak v některých dnech, zvláště během léta, se odpoledne přizpůsobí bouřka, sluníčko se schová, zemi zkropí déšť a teplota je rázem o poznání nižší než před hodinou či dvěma. Dost podobným způsobem, jako když letní bouřka nakrátko zchladí odpolední žár, se i krátkodobé klimatické výkyvy (trvající desítky až tisíce let) odehrávají na pozadí delších a předvídatelnějších změn s orbitálním časovým rámcem.

Důvod, proč jsou tyto krátké výkyvy výrazně menší v dobách, jako je ta dnešní, kdy v Severní Americe ani Eurasii nejsou žádné nebo jen velmi malé ledovce, není zatím zcela jasný. Poslední velký klimatický výkyv nastal před 12 000 lety, kdy byly ledovce stále ještě rozsáhlé, o něco menší se odehrál před 8200 lety, když již led téměř roztál. Od té doby, zatímco lidé vytvářeli nejprve primitivní a později stále vyspělejší civilizace, byly tyto výkyvy citelně menší.

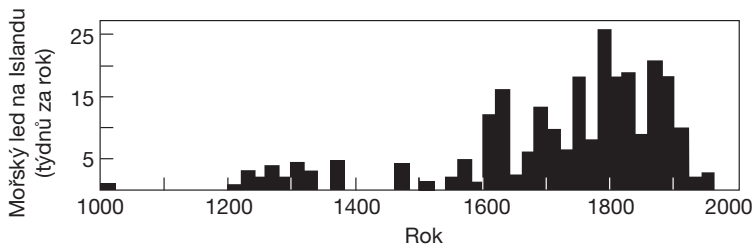
Největší přerušení tohoto relativně stabilního klimatického vývoje představuje ochlazení během středověku, kterému se říká „malá doba ledová“. Různé prameny jí připisují různou délku trvání od největšího rozmezí let 1250–1900 až po nejmenší v letech 1550–1850. Malé době ledové údajně předcházelo období kratšího oteplení (tak zvaného středověkého klimatického optima) s nejvyššími teplotami zhruba v letech 900–1200. Malá doba ledová skončila s oteplením industriální éry na počátku 20. století, jež trvá dodnes.

Na některých místech byla tahle „malá doba ledová“ ve skutečnosti docela velká. Většina z nich leží poblíž současné hranice polárního sněhu a ledu, kde dochází ke značnému zesílení klimatických změn. Pro obyvatelé horských vesnic, kteří na

vlastní oči viděli ledovce sestoupit o nějakých 100 metrů ze svahu a rozdrtit jejich usedlosti a vesničky na prach, byla „malá doba ledová“ opravdu velká věc. Louis Agassiz si na základě těchto dramatických posunů domyslel, že se na Zemi kdysi vyskytovaly ledovce veliké jako kontinenty (viz 4. kapitolu). Poslední podobnou událost z konce 19. století zachycuje řada dobových rytin a několik průkopnických fotografií. Jak led postupoval, vzala za své i horní hranice stromových porostů. Občasné ústupy ledovců v předešlých stoletích ale ukázaly, že „malá doba ledová“ nebyla obdobím neutuchajícího mrazu, ačkoliv bylo chladněji než dnes.

Nejchladnější dekády „malé doby ledové“ byly velmi důležité také pro farmáře snažící se pěstovat plodiny náchylné na mráz, například kukuřici a vinnou révu, ve vyšších zeměpisných šířkách a v mezních oblastech, kde je jejich pěstování obtížné i za těch nejlepších podmínek. Přicházely roky a někdy i desetiletí, kdy úrodu ničily nečekané mrazy nebo kdy byla sklizeň opožděná, protože bylo extrémně chladné či deštivé léto. Vinohrady založené v Británii v době klimatického optima byly postupně, jak se „malá doba ledová“ prohlubovala, opuštěny, ve Francii a v Německu se hranice vinařských oblastí posunuly o dobrých 500 kilometrů na jih. V horách severní a západní Británie nebylo pro změnu nadále možné pěstovat obiloviny.

Dalším místem, kde zimy „malé doby ledové“ způsobily převratnou změnu, byl Island, země odedávna závislá na lovu tresek a dalších ryb, jež však nebyly jen výhodnou vývozní komoditou, ale především základním zdrojem obživy obyvatel. Během zimy se moře v okolí tamních přístavů na mnoho dní zatáhlo tabulovým ledem a lodě nemohly opustit svá kotviště. Islandané, kteří v důsledku toho museli sedět doma, si vedli přesné záznamy o počtu dní, po které byli od otevřeného moře oddělení nepřekonatelnou ledovou bariérou (viz obr. 12.2). V letech 1000–1200 byl mořský led poměrně vzácný, avšak od roku 1200 až do 19. století ho byla hojnost; ve 20. století jeho množství opět pokleslo.



**Obr. 12.2** Počet týdnů, po něž byly znepřístupněny přístavy severního Islandu nahromaděným mořským ledem, po několik století stoupal, aby během 20. století prudce poklesl

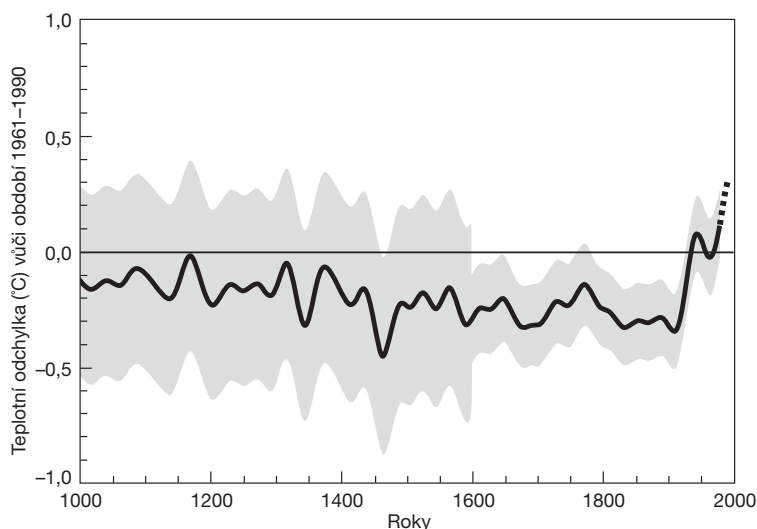
Přesto podobné záznamy o mořském ledu a horských ledovcích vypovídají pouze o malé části zemského povrchu a zdaleka nezachycují situaci v její celkové šíři. Tak například na východě Spojených států byla v letech 1976–1977 na tamní poměry velmi chladná zima, přístavy na jih od New Yorku byly zahlcené ledem. O dvacet let později, v zimě roku 1996, napadlo v mnoha státech na Východě nejvíce sněhu za celé poslední století. Přesto tyto mrazivé, sněhem zaváté zimy přišly v době, kdy se planeta v průměru pozvolna nezvykle oteplovala. Jakkoliv tehdy na východním pobřeží Severní Ameriky panovaly staré dobré zimy (takové, o jakých vyprávěl dědeček), planeta jako celek se ohřívala. Záznamy z jedné či dvou oblastí o celku rozhodně nevypovídají.

Proto někteří vědci vyjádřili pochybnost, jestli v globálním měřítku něco jako „malá doba ledová“ (popřípadě středověké klimatické optimum) vůbec existovalo. Na takovou námitku lze reagovat jedině přezkoumáním detailních záznamů o teplotních změnách z mnoha různých oblastí. Bohužel historické záznamy s vysokým rozlišením, které by sahaly několik století nazpátek (jako třeba ten z Islandu), jsou opravdu velmi vzácné. A tak se místo toho klimatologové uchýlili k postupům, s jejichž pomocí dokázali vyčíst data o klimatu z archivu přírody.

Nejčastěji využívaným přírodním archivem klimatických změn jsou přibývající letokruhy dlouhověkých stromů, přesněji tloušťka každého jednotlivého letokruhu. V oblastech, kde

obvykle panují chladná a nevlídná léta, tvoří stromy silnější letokruhy v dobách, kdy jsou podmínky náhle lepší a přijdou o něco teplejší (či deštivější) roky. Vědci proto v různých oblastech Eurasie a americké Arktidy během léta, kdy je tam spousta otravných komárů, pátrají po dlouhověkových stromech a opatrně z nich odvtávají jádra tenká jako tužky; vědí, jak to udělat, aby tím stromy nepoškodili. Když se vrátí do laboratoře, spočítají letokruhy, přiřadí je jednotlivým rokům v minulosti a následně změří jejich tloušťku (či jiné vlastnosti); poté vyhotoví záznam o každoročních změnách teplot za dobu života stromu. Záznamy tohoto druhu jsou nyní dostupné ze vzdálených severních zeměpisných šířek celé Arktidy.

Jiný typ záznamu o každoročních proměnách teplot je k dispozici ze středních zeměpisných šířek a z tropů. Ve vysokých nadmořských výškách se vrstvy sněhu postupně mění v kom-



**Obr. 12.3** Rekonstrukce teplotního vývoje na severní polokouli za posledních 1000 let ukazuje, že na sklonku 19. století se kolísavě ochlazovalo, aby se ve 20. století nečekaně prudce oteplilo. Šedá plocha pokrývá případné nepřesnosti

paktní led, v horský ledovec, který je nositelem rozsáhlého klimatického záznamu s rozlišením jednoho či téměř jednoho roku. Srdnatí vědci (jako legendární Lonnie Thompson) šplhají do výšek 6000 i více metrů nad mořem, kde to znají leda profesionální horolezci, a tam odvrstávají ledová jádra. Cestou nahoru si nesou všechno potřebné vybavení a jídlo, na sestupu k nákladu přidají stovky metrů nově odvrstvaných ledových jader.

Ne všechna práce vynaložená na získání každoročních záznamů o klimatu je tak náročná. V tropických mořích vrství některé druhy korálů útesy stylem jedna vrstva za rok, a z nich se jádra odebírají v teplých mělkých modravých vodách. Z většiny korálových útesů v blízkosti pohodlných hotelů již byla jádra odebrána, a tak se nyní tato práce neobejde bez malých letadel, jimiž se vědci dopravují na odlehlé ostrovy, kde člověk nejenže o luxus nezavadí, ale ještě tam může chytit nějakou exotickou tropickou nemoc.

Z těchto přírodních archivů získali vědci staleté záznamy na desítkách míst, většinou na severní polokouli. Meteorolog Mike Mann a jeho kolegové Ray Bradley a Malcolm Hughes v roce 1999 s pomocí matematických postupů vypracovali křivku odhadovaného teplotního vývoje za posledních 1000 let na severní polokouli. Rekonstruovaný trend (viz obr. 12.3) je známý jako „hokejka“. Postupné ochlazování od roku 1000 n. l. přibližně po začátek 20. století představuje rukojeť hokejky, výrazně rychlejší oteplení patrné ve 20. a na počátku 21. století je její zahnutá čepel. Jak rukojeť, tak čepel zahrnují také krátkodobé teplotní výkyvy, avšak celkový trend vypadá (na první pohled) opravdu jako hokejka. Řada dalších rekonstrukcí sestavených ze záznamů z různých míst prokázala v podstatě tentýž trend.

Z širšího pohledu obrázek 12.3 ukazuje přinejmenším to, že středověké období přibližně od roku 1000 do roku 1200 bylo relativně teplé, porovnáme-li je s postupným a poněkud neučesaným ochlazováním během dalších století. Žádný jiný časový úsek nevyčnívá tolik jako začátek „malé doby ledové“, přičemž

v letech 1600–1900 už byly teploty jednoznačně nižší než v předešlých údobích. Pokud teplejší období let 1000–1200 použijeme jako výchozí stav, byla průměrná teplota v letech 1600–1900 o 0,1–0,2 °C nižší, přičemž extrémně chladné dekády vykazovaly ochlazení až o 0,4 °C.

Co mohlo tento postupný a kolísavý trend patrný po roce 1200 způsobit? Jedním faktorem zde může být pomalé ochlazování ve vzdálených severních oblastech v reakci na orbitální změny slunečního záření (viz 10. kapitolu). V některých částech Arktidy se za 9000 let ochladilo o 1–2 °C. Použijeme-li tuto hodnotu jako průměr, za 900 let by to dělalo 0,1–0,2 °C, což přesně odpovídá vývoji zachycenému na křivce. Jenže na tom nelze postavit celý výklad: průměrný teplotní pokles na celé severní polokouli by byl o dost menší než jeho velikost ve vyšších zeměpisných šířkách (kde je odezva zesílena), tj. pravděpodobně by byl nižší než 0,1 °C. K ochlazení musely přispět další faktory.

Jedním z možných viníků jsou velké sopečné erupce, které do atmosféry chrlí množství oxidu siřičitého, a to až do výšky 15 kilometrů, tedy dost vysoko nad mraky. Tento plyn reaguje s vodní párou za vzniku kyseliny sírové, jejíž drobné kapičky odrážejí část dopadajícího slunečního záření, které tak nedoputuje na zemský povrch. V důsledku toho se klima ochladí a teplota zůstane nižší zhruba po dva roky, než zemská gravitace drobné kapičky přitáhne do nižších vrstev atmosféry, odkud je sněh či déšť rychle vymyjí. Jeden výbuch sopky tedy může klima výrazně ochladit na jeden až dva roky, nicméně aby zůstalo chladněji po celou dekádu, musely by sopky vybuchovat několik let za sebou jako na běžícím pásu.

Tropické erupce mohou ochladit celou planetu, jelikož se při nich oxid siřičitý rozšíří rovnoměrně nad obě hemisféry, naopak výbuchy sopek na sever a na jih od rovníku způsobí ochlazení jen na té polokouli, na níž dojde k výbuchu. Ochlazujícího vlivu sopečných výbuchů na klima si všiml už Benjamin Franklin, když v roce 1784, krátce po erupci sopky na Islandu, pozoroval při západu slunce barevnou oblohu a poté nezvykle chlad-



né léto. Po výbuchu sopky Tambora v roce 1883<sup>1</sup> se v Nové Anglii nevyvedla sklizeň, jelikož přišly přízemní mrazíky; místní obyvatelé tento rok přirovnávali k „roku bez léta“ (1816). Mnohé z těchto dřívějších erupcí byly o dost silnější než výbuch sopky Mount Pinatubo na Filipínách v roce 1992, a ten vykouzlil opravdu překrásné západy slunce a ochladil na jeden rok globální klima o 0,3 °C.

Druhým faktorem, který zřejmě mohl ovlivnit klima na několik století či desítek let, je měnící se zářivý výkon Slunce. (Pozor, nezaměňovat se změnami oslunění zapříčiněnými výchylkami zemské orbity!) Družicová měření prováděná od roku 1981 prokázala malé změny zářivého výkonu naší hvězdy, které časově kolidovaly se změnami počtu slunečních skvrn. Skvrny jako chladnější oblasti slunečního povrchu sice snižují množství vyzářené energie, avšak výsledný efekt je právě opačný: jsou-li skvrny hojné, vydává Slunce více záření, protože zesílená aktivita zbylého povrchu lokální deficit více než vyrovnává.

Počet slunečních skvrn i intenzita slunečního záření pravidelně kolísá z maxima na minimum a zase zpátky v cyklu trvajícím 11 let. Tento 11letý cyklus slunečních skvrn lze dobře pozorovat hvězdářským dalekohledem a pečlivé záznamy o něm sahají až do 18. století. Jenže téměř žádný klimatický záznam ze zemského povrchu nenese přesvědčivé stopy teplotních změn v 11letém cyklu, neboť změny zářivého výkonu jsou jen malé. To však neznamená, že změny zářivého výkonu Slunce nemají vliv na delší časové úseky. Pozorování prováděná ve středověku hvězdářskými dalekohledy napovídají, že „shluky“ 11letých cyklů slunečních skvrn mohou vykazovat dosti odlišnou amplitudu, a dokonce se mohou i zcela vytratit, jako se to stalo například v letech 1645–1715. Někteří (ale ne všichni) klimatologové věří, že tato kratší období s menší četností výskytu slunečních skvrn (a tedy snížením zářivého výkonu Slunce) částečně přispěly k ochlazení klimatu v „malé době ledové“.

---

<sup>1</sup> V roce 1883 vybuchla sopka Krakatoa. Pozn. red.

A co skleníkové plyny? Jakou ty zde sehrály roli? Určitě musely mít prsty v rychlém oteplení patrném na čepeli „hokejky“; jak tempo, tak míra jejich nárůstu nemá v záznamu z minulých devíti století obdoby. Tento nedávný oteplovací trend ještě detailněji zmíním v páté části této knihy. Jenže co znamená záznam z předchozího období, zejména „poskakování“ CO<sub>2</sub> patrné na obrázku 12.1? Poslední minimum CO<sub>2</sub> (v letech 1500 až 1750) odpovídá přinejmenším přibližně nejstudenějšímu období „malé doby ledové“, přičemž vyšších hodnot dosahoval CO<sub>2</sub> v teplejších dobách středověku, mezi roky 1000 a 1200.

Konvenční výklad této souvztažnosti mezi teplotou a CO<sub>2</sub> říká, že „hlavní příčinou“ ochlazení a poklesů koncentrace CO<sub>2</sub> v atmosféře nad severní polokoulí jsou změny související s vulkanickými erupcemi nebo se slunečním zářením. Podle tohoto výkladu hladina CO<sub>2</sub> klesá, když se na Zemi výrazně ochladí, protože tak zkrátka velí chemie: chladný oceán pohltí více CO<sub>2</sub> než teplý. Pokud sopečná činnost a solární výkyvy ochladí zemské klima, přijme oceán více CO<sub>2</sub> z atmosféry. Je-li tento výklad správný, jsou hemisférické změny teplot i výkyvy CO<sub>2</sub> jednoduše dvě reakce klimatického systému na přirozené (solární a vulkanické) změny.

Jenže tohle vcelku uspokojivě znějící vysvětlení má jednu závažnou trhlínu. Dnešní nejspolehlivější klimatické modely jsou navrhovány tak, aby co možná věrně napodobovaly všechny složité reakce mezi atmosférou, oceánem, zemským povrchem, vegetací a sněhem a ledem. Takové modely usilují o simulaci všech těchto navzájem provázaných reakcí, avšak nesnaží se je jednotlivě analyzovat. Když vědci vyčíslují změny množství slunečního záření vstupujícího do klimatického systému jako následek vulkanických erupcí nebo změn slunečního svitu, napodobují tyto modely souhrnnou odezvu mnoha součástí klimatického systému, včetně změn teploty a hladiny CO<sub>2</sub> v atmosféře.

Při zevrubnějším zkoumání jedné z těchto modelových studií jsem si všiml výsledku, který ukazoval na velký nedostatek v „přírodním“ výkladu. Aby dosáhl největšího poklesu CO<sub>2</sub>

(o 10 ppm), musel model ochladit klima o téměř 1 °C; přitom rekonstruovaný teplotní trend (viz obr. 12.3) dovoľoval, aby teploty mezi teplejšími roky 1000–1200 a chladnějšími roky 1500–1750 poklesly jen o 0,1–0,2 °C. Stejně tak pokud měly modely zachovat malé změny teplot, jak je vidíme na rekonstrukci, mohly povolit odchylku CO<sub>2</sub> o velikosti nanejvýš 2 až 3 ppm, nikoliv pozorovaných 10 ppm (viz obr. 12.1). Ať už jsem se na to díval z jakéhokoliv konce, změny CO<sub>2</sub> byly ve vztahu ke změnám teplot příliš velké. Něco mi na konvenčním výkladu nesedělo.

Přírodní výklad ve mně budil nedůvěru ještě z jiného důvodu. Tempo poklesů CO<sub>2</sub> mi připadalo dosti značné, ve skutečnosti se mi jevíly jako mnohem náhlejší než přirozené změny, k nimž došlo na konci posledního odlednění i během tří odlednění předešlých. Na obrázku 9.1 lze vidět, jak koncentrace CO<sub>2</sub> během těchto odlednění vyšplhaly za více než 5000 let na necelých 100 ppm, což v průměru dělá asi 2 ppm za století. Naproti tomu koncentrace CO<sub>2</sub> na obrázku 12.1 klesaly a narůstaly o 10 ppm v rozmezí zhruba stovky let, což je tempo přibližně 10krát větší. Proč by se v době globálně stabilního klimatu měnily hodnoty CO<sub>2</sub> o tolik rychleji než v době dynamických klimatických změn, které přicházely s koncem glaciálních cyklů? To mi nešlo na rozum.

Výklad postavený jen na přirozených klimatických změnách tedy opět neobstál. Znovu mi přišlo na mysl, že jediné řešení téhle zdánlivě neřešitelné situace je třeba hledat mimo oblast „přírodních“ příčin, že vysvětlení musí nějak souviset s lidmi. Že se musí odvíjet od nějakého procesu, který mohl omezit postupné odlesňování a s ním související uvolňování CO<sub>2</sub> a který mohl způsobit náhlé poklesy koncentrace CO<sub>2</sub> v atmosféře, jež trvaly několik desetiletí či jedno nebo dvě století.