

Univerzita Karlova v Praze

Přírodovědecká fakulta

Ústav pro životní prostředí

Měření solární konstanty a globální teploty

Přemysl Valeška

září 2009

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a informací, na něž odkazuji. Svoluji k jejímu zapůjčení s tím, že veškeré (i přejaté) informace budou řádně citovány.

3. září 2009

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Veleš', written in a cursive style.

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce RNDr. Rudolfu Přibilovi, CSc. za ochotu a poskytnutí užitečných rad a informací.

Obsah

Abstrakt	5
Abstract	6
1. Úvod.....	7
1.1. Intenzita slunečního záření.....	9
1.2. Procesy probíhající na Slunci.....	12
1.3. Proxy data.....	15
2. Měření solární konstanty	17
2.1. Rozdíly v satelitním měření solární konstanty	17
2.2. Radiometry s aktivními dutinami.....	19
2.3. Nejistota měření	22
2.4. Potenciální zdroje chyb	24
2.4.1. Velikost průzoru.....	24
2.4.3. Rozptyl světla.....	27
2.4.4. Tepelné pozadí	29
2.4.5. Jouleovo teplo	29
2.5. Tvorba sloučených záznamů solární konstanty.....	30
3. Průměrná globální teplota.....	34
3.1. Koncept průměrné globální teploty.....	34
3.2. Historie analýzy povrchové teploty Země	38
3.3. Současná metoda analýzy.....	39
3.4. Data z historických meteorologických pozorování.....	40
3.4.1. Zdroje dat	43
3.4.2. Eliminace duplicit	47
3.4.3. Distribuce stanic.....	49
3.4.4. Kvalita dat	54
3.4.5. Homogenita	55
3.4.6. Metadata	58
3.4.7. Aktualizace.....	60
3.5. Povrchová teplota moře.....	61
3.6. Průměrná globální teplota jako ukazatel změn klimatu	64
4. Sluneční záření a dlouhodobé změny klimatu.....	68
4.1. Jedenáctiletý sluneční cyklus a krátkodobé variace solární konstanty	71
4.2. Působení slunečního větru.....	72
5. Závěr	74
6. Seznam zkratk	78
7. Seznam literatury	80

Abstrakt

Sluneční záření je daleko nejdůležitějším zdrojem energie na Zemi. Intenzita slunečního záření není konstantní, ale mění se vlivem procesů, které se na Slunci odehrávají. Měření solární konstanty umožňuje tyto změny pozorovat a posoudit jejich možný vliv na globální teplotu na Zemi. Její hodnota je odvozována z velkého počtu měření teplot získaných z mnoha stanic rozmístěných po planetě a v posledních desetiletích více či méně roste.

Tato diplomová práce se zabývá procesem satelitního měření solární konstanty, které probíhá od 80. let 20. století. Jelikož měření různými přístroji na oběžné dráze poskytuje mírně odlišné výsledky, je poměrně velký prostor věnován hledání potenciálních zdrojů těchto rozdílů. Ty většinou spočívají v technických odlišnostech mezi radiometry. Přes rozdíly v měření lze vypořádat určité náznaky vzestupného trendu v intenzitě slunečního záření za posledních několik dekad, nicméně tento trend je příliš malý, než aby mohl vysvětlit udávaný nárůst globální teploty v tomto období. Druhá hlavní část práce je věnována procesu určování průměrné globální teploty a některými jeho významnými nedostatky, kterými jsou například nedostatečná distribuce měřících stanic, fenomén tepelného ostrova a další. Poslední část práce naznačuje způsob, kterým změny sluneční aktivity ovlivňují klima na Zemi.

Abstract

Solar radiation is the most important energy source on the Earth. The intensity of the solar radiation isn't constant. It varies over time due to the various processes on the Sun. Measuring the solar constant allows us to examine these changes and consider their possible influence to the Earth's global temperature. Global temperature is derived from many temperature measurements from stations around the world and it grows over the last few decades.

This diploma thesis deals with the proces of satellite-based measuring of solar constant, which started in 1980's. Various instruments on the Earth's orbit provide slightly different results. Potential sources of this difference are examined at some length. The difference is mainly due to design dissimilarities of used instruments. Aside from the diference, there is a suggestion of a positive trend in solar intensity over the last few decades, but it's not sufficient to explain the supposed increase in the global temperature. The second main part of this diploma thesis is dedicated to determining the average global temperature including specific limiting factors of this process. These factors are for example insufficient distribution of measuring stations, inhomogenity of the datasets, urban warming, etc. The last part of the thesis shows how the variations in solar irradiance may influence the Earth's climate.

1. Úvod

Globální oteplování, definované jako vzrůst průměrné globální teploty a prezentované jako následek antropogenních emisí skleníkových plynů, je v současnosti velmi diskutované téma. Očekává se, že změny teplot budou mít velmi negativní vliv na lidstvo i biosféru jako takovou. Oteplení může navíc odstartovat lavinu pozitivních i negativních zpětných vazeb, přičemž následky jsou jen těžko odhadnutelné. Většina současných vědců bere globální oteplování jako reálnou hrozbu, zatímco téměř každá snaha o diskuzi či zpochybnění této teorie je bagatelizována a označována jako lobbying placený průmyslovými korporacemi. Důkazy o globálním oteplování jsou však spíše nepřímé a deduktivní. Stejně tak tvrzení, že se tak děje výhradně působením lidské činnosti není jasně prokázáno. Nabízí se i varianta, že nárůst teplot souvisí se sluneční aktivitou. Intenzita slunečního záření se mění v čase a pokud by se ukázalo, že zde existuje dlouhodobý vzestupný trend, mohla by to být přinejmenším jedna z příčin předpokládané změny klimatu.

Klíčovou roli při výzkumu klimatické změny a možných souvislostí mezi ní a sluneční aktivitou hraje kvalita dostupných údajů o globální teplotě a potažmo solární konstantě. Solární konstanta je od 80. let 20. století měřena pomocí přístrojů na satelitech, měření z dřívějších dob jsou značně nepřesná, ale ani satelitní měření se nevyhnulo určitým problémům. Hodnota globální teploty se určuje jako průměr teplot z více než 7000 stanic, rozmístěných velmi nepravidelně po zemském povrchu, který je zkombinován s průměrnou povrchovou teplotou moří, naměřenou pomocí satelitů. Proces tvorby údaje, který by měl reprezentovat celé teplotní pole Země je provázen značnými nejistotami a pochybnostmi.

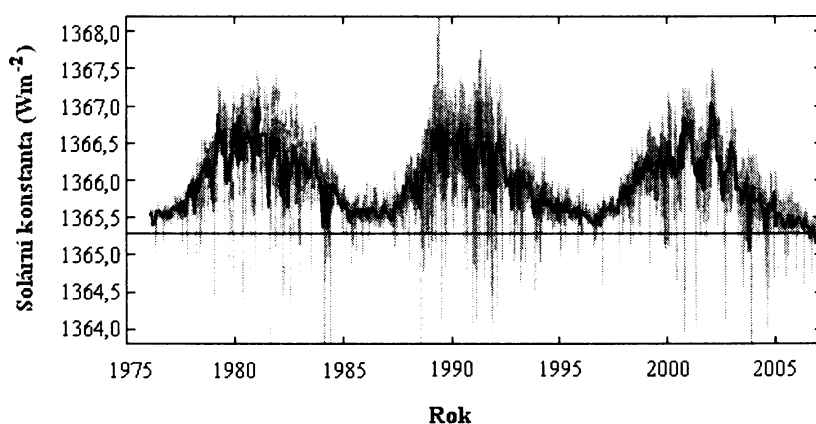
Mezi hlavní cíle této diplomové práce patří popis způsobu měření solární konstanty pomocí přístrojů na satelitech, zhodnocení celkové nejistoty tohoto měření a označení potenciálních zdrojů chyb. Otázkou na kterou se snažím odpovědět je, jaký je v posledních

letech trend intenzity slunečního záření. Dalším hlavním cílem je popsat proces tvorby globální teploty z naměřených historických i současných dat. Zde je pozornost upřena na kvalitu dat a určité velmi problematické kroky tohoto procesu. Konečně poslední část práce je zaměřena na hledání souvislostí mezi změnami solární konstanty a změnami zemského klimatu.

1.1. Intenzita slunečního záření

Slunce je zdrojem drtivé většiny energie na Zemi, je proto logické začít právě u něj. Průměrná intenzita slunečního záření, které dopadá na zemskou atmosférou je charakterizována solární konstantou. Ta je definována jako celkový zářivý tok slunečních paprsků dopadající kolmo na plochu 1 metru ve vzdálenosti 1 astronomické jednotky (střední vzdálenost Země od Slunce, přibližně $150 \cdot 10^9$ m). Uváděná hodnota solární konstanty se liší zdroj od zdroje, nejčastěji se udává 1366 Wm^{-2} . Insolace je různá v různých zeměpisných šířkách a v různou roční dobu. Hodnota energie záření, vyjádřená jako průměrná hodnota dopadající na celý povrch Země (horní okraj atmosféry) se rovná jedné čtvrtině solární konstanty, tedy asi $341,5 \text{ Wm}^{-2}$ v průměru za celý rok (Christiansen, 2005).

Skutečná hodnota energie je ovlivněna mnoha faktory. Nejdůležitějším je vzdálenost Země a Slunce, která se mění vlivem eliptické oběžné dráhy Země. Intenzita záření se tak může odchylovat až o $\pm 3,5 \%$ (podle toho, zda je Země v periheliu či afeliu). Tato skutečnost se při měření solární konstanty upravuje korekcí na vzdálenost jedné astronomické jednotky. Kromě změn vzdálenosti, se mění i samotná aktivita slunce a to např. v jedenáctiletém cyklu slunečních skvrn (obr. 1).



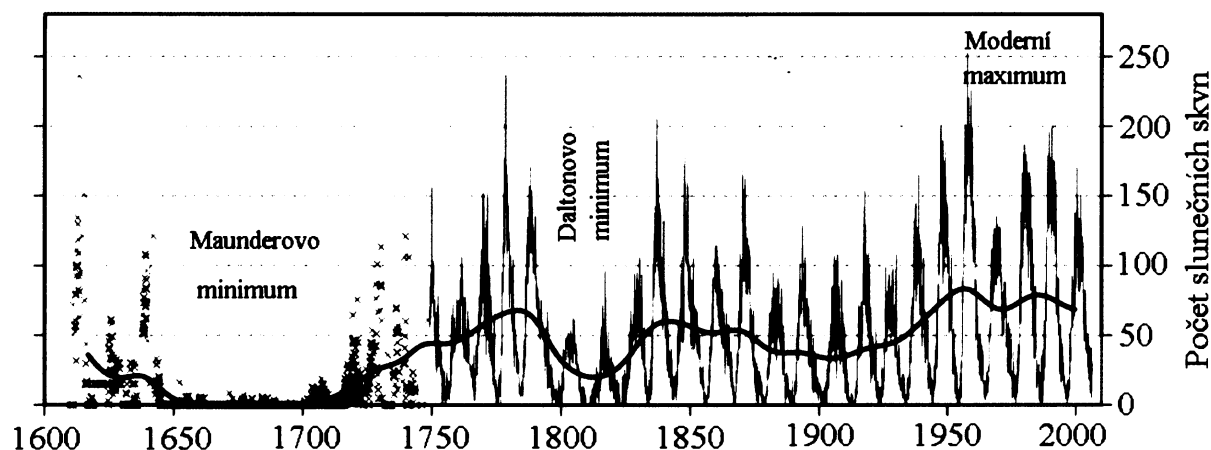
Obrázek 1. Změny solární konstanty v průběhu posledních tří solárních cyklů (Lockwood et al. 2007).

Mezi minimem a maximem cyklu je rozdíl asi $1,3 \text{ Wm}^{-2}$ (asi 0,1%) (Lockwood et al. 2007). Odhadovaný klimatický vliv změn solární konstanty během cyklu slunečních skvrn není velký. Variace solární konstanty během cyklu činí asi $1,3 \text{ Wm}^{-2}$ na horním okraji atmosféry, což znamená rozdíl průměrně $0,23 \text{ Wm}^{-2}$ na zemském povrchu. K této hodnotě se dospělo z předpokladů, že Slunce ozařuje průměrně jednu čtvrtinu povrchu Země a navíc přibližně 30% záření se odrazí od atmosféry zpět do kosmu a není tedy započítáno. Odhady klimatického působení slunečního záření se různí. Pro naši potřebu použijeme odhad podle Christiansena (2005), kdy nárůst intenzity slunečního záření o 1 Wm^{-2} způsobí nakonec zvýšení průměrné globální teploty o $0,5\text{-}0,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Rozdíl intenzity záření během slunečního cyklu by tedy způsobil změnu globální teploty o zhruba $0,14\text{-}0,18 \text{ }^{\circ}\text{C}$, pokud by trval dostatečně dlouhou dobu, aby mohl být jeho vliv realizován. Nicméně vzhledem k vysoké tepelné kapacitě oceánů trvá dlouhou dobu, než se klimatický vliv zvýšené intenzity záření plně projeví. Během cyklu slunečních skvrn hodnota solární konstanty stoupá a zase klesá, takže se vlivy těchto variací na klima v podstatě vyruší (Christiansen, 2005).

Variace solární konstanty během cyklu slunečních skvrn tedy nemají znatelný vliv na klima, ovšem pouze za předpokladu že mají tyto cykly přibližně stejnou amplitudu, jako je tomu u posledních tří cyklů. U těch jako jediných máme k dispozici data hodnot solární konstanty naměřená ze satelitů. U předchozích cyklů jsme odkázáni na proxy data (viz kapitola 1.3.), hlavně pak záznamy o počtu slunečních skvrn. Při pohledu na historii těchto záznamů je jeví nápadně tzv. Maunderovo minimum, období přibližně mezi roky 1638 a 1715, kdy se na Slunci neobjevovaly téměř žádné sluneční skvrny (obr. 2). Maunderovo minimum časově odpovídá tzv. malé době ledové, teplotní anomálii, která znamenala nejchladnější období za posledních 2000 let. Malá doba ledová trvala přibližně mezi 14. a 19. stoletím s vrcholem v 17. století. Ačkoliv je malá doba ledová vysvětlována působením jiných faktorů, například změnami oceánické cirkulace, je pravděpodobné, že snížená sluneční

aktivita, zaznamenaná jako nepřítomnost slunečních skvrn, byla minimálně jednou z příčin neobvykle nízkých povrchových teplot v tomto období (Reid, 1995).

Historické záznamy o počtu slunečních skvrn

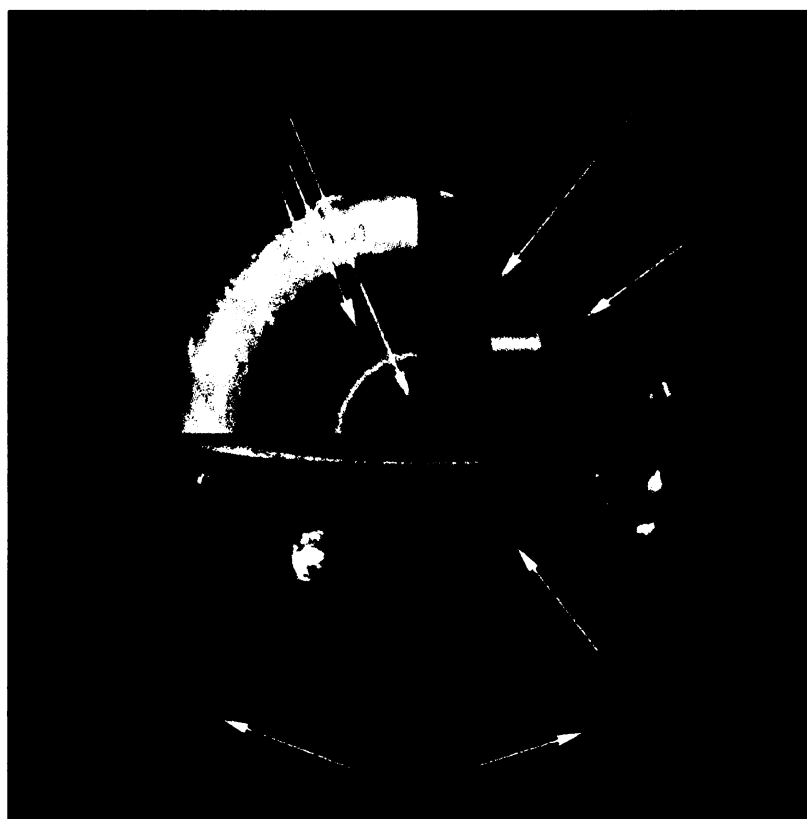


Obrázek 2. Grafické znázornění změn počtu slunečních skvrn během 400 let pozorování Slunce. Jasně je vidět Maunderovo minimum, během kterého byl počet skvrn o tři řády nižší, než v současnosti. Dále je na obrázku vidět slabší Daltonovo minimum na začátku 19. století a nárůst průměrného počtu slunečních skvrn s příchodem tzv. moderního maxima (Wikipedia, 2009).

Malá doba ledová nesouvisí se skutečnými glaciály, které se podle současných poznatků vyskytovaly periodicky ve čtvrtohorách, měly dobu trvání 40 – 100 tisíc let a znamenaly pokles teplot, rozšíření pevninského zalednění i mořského ledu, suché klima, ukládání sedimentů a degradaci ve vývoji rostlin a živočichů. Glaciály jsou připisovány existenci tzv. Milankovičových cyklů, které jsou způsobeny změnami v parametrech oběžné dráhy Země kolem Slunce. Těmito parametry jsou: sklon zemské osy (při zvětšení úhlu sklonu zemské osy dochází k zvětšení rozdílu mezi létem a zimou), precese rotační osy Země a výstřednost oběžné dráhy Země kolem Slunce (Kutílek, 2008).

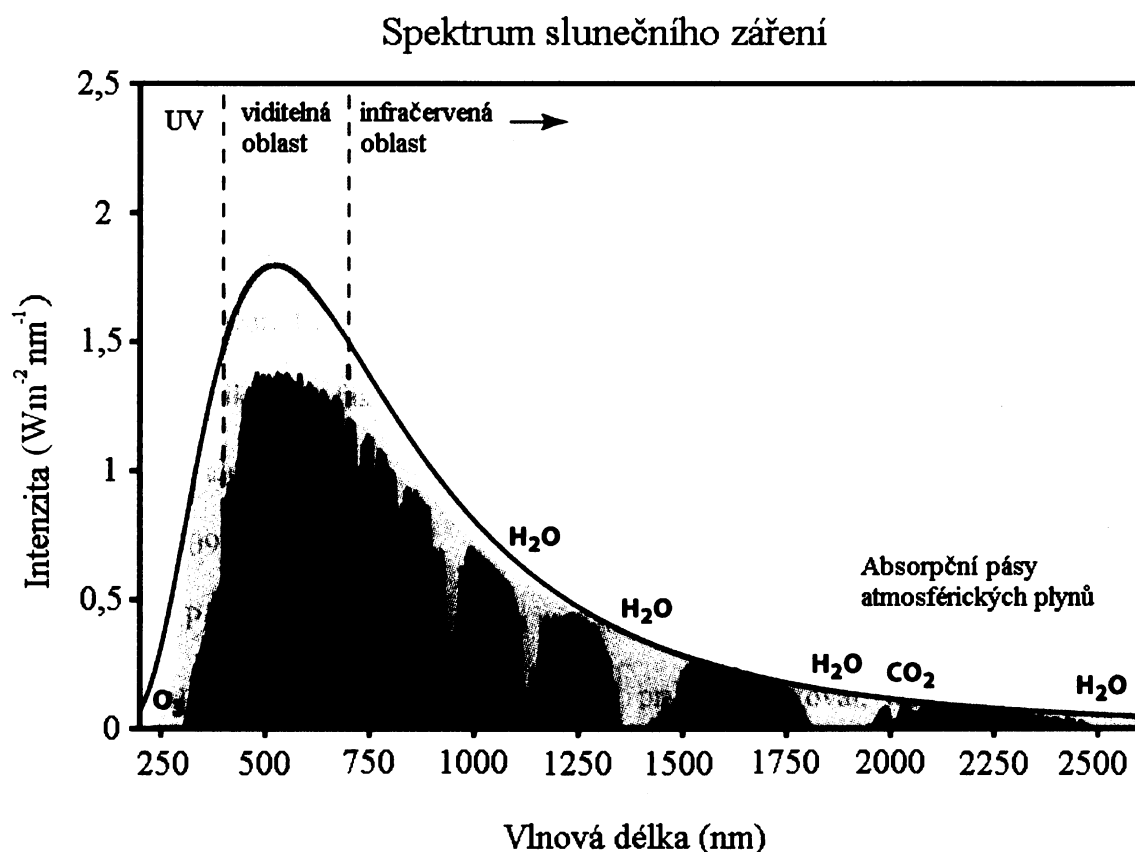
1.2. Procesy probíhající na Slunci

Slunce je hvězda hlavní posloupnosti, spektrální třídy G2, jedna z více než 100 miliard hvězd v naší galaxii. Sluneční těleso není homogenní, ale skládá se z různých vrstev (viz obr. 3). Podmínky ve slunečním jádru (přibližně vnitřních 25% jeho poloměru) jsou extrémní. Teplota zde dosahuje asi 15,6 miliónů Kelvinů a tlak je 250 miliard atmosfér. Plyny v jádru jsou stlačeny tak, že mají 150krát větší hustotu než voda. Povrch Slunce, nazývaný fotosféra, má teplotu zhruba 5900 K. Nad ním se nacházejí ještě dvě další vrstvy: chromosféra a korona (Bílek et al. 2006).



Obrázek 3. Struktura Slunce. Teplota Slunce dosahuje nejvyšších hodnot v jádře, kde probíhá termojaderná reakce a směrem k povrchu Slunce postupně klesá (Cain, 2009).

Sluneční záření poměrně přesně odpovídá záření černého tělesa o teplotě 5900 K (obr. 4). Spolu s tímto zářením pak vyzařuje Slunce emisní čáry řady prvků v rentgenové a ultrafialové oblasti, dále emituje (na opačném pólu spektra) rádiové vlny a kromě toho elementární částice různých energií. Toto záření dosahuje vrchního okraje atmosféry, nikoliv však povrchu Země. Atmosféra propouští jen část záření (Moldan, 1977).



Obrázek 4. Spektrální rozložení slunečního záření na okraji zemské atmosféry (žlutá plocha) a při hladině moře (červená plocha). Šedá křivka značí záření černého tělesa o teplotě 5250 °C, fialovým nápisem jsou označeny hlavní absorpční pásy atmosférických plynů (Wikipedia, 2009).

Pro pozemského pozorovatele má Slunce buněčnou strukturu, která je tvořena jasnými granulemi a tmavým mezigranulovým prostorem. Granule mají nepravidelný, často mnohoúhelníkový tvar a jsou od sebe navzájem odděleny tmavými mezigranulovými pruhy. Tento jev je způsoben konvekcí sluneční hmoty, o čemž svědčí vertikální výstupní proudění

uprostřed jednotlivých granulí, jakož i horizontální proudění roztékající se plazmy. Granulace způsobuje variace v intenzitě slunečního záření trvající asi 10 minut. Průměrná životnost jednotlivých granulí se pohybuje kolem 8 minut, v ojedinělých případech může jednotlivá granule vydržet až 15 minut. Mnoho granulí vybuchuje. Tento jev je charakterizován zvyšováním jasů granule a jejím rozpínáním. Vybuchující granule vytvářejí prstenec, který se potom rozpadne na části. Doba tohoto často pozorovatelného jevu je asi 10 minut (Bílek et al. 2006).

Dalším jevem jsou fakule, které vypadají jako nepravidelná jasná místa, jejichž kontrast se zvyšuje směrem k slunečnímu okraji a jsou větší, pokud je doprovází skupina slunečních skvrn. Jejich velikost zpravidla nepřesahuje 1000 km a mají protáhlý tvar ve směru magnetických siločar. Tyto oblasti jsou méně husté než okolí a jelikož záření z nižších vrstev pod fotosférou uniká přes fakule do vesmírného prostoru, zdají se tato místa teplejší a světlejší než okolí. Fakule způsobují variace intenzity slunečního záření trvající desítky týdnů (Wikipedia, 2009).

První záznamy o skvrnách na Slunci pocházejí už z čínských kronik a za jejich objevitele je považován ten, kdo tento objev první publikoval, tedy německý astronom Johannes Fabricius. Skvrny, které se ze Země jeví jako černé body na Slunci, jsou ve skutečnosti oblasti fotosféry se sníženou teplotou, zářením a tlakem plynu a vyskytují se v oblastech s intenzivní magnetickou aktivitou. Za skvrn "tryskají" magnetické siločáry, které se následně vrací zpět. Jelikož jsou tyto siločáry pokroucené, brzdí stoupající horké oblaky v konvektivní zóně, čímž je potlačen tok energie z nitra Slunce do skvrny. Větší skvrny se skládají z jádra - tmavé umbry a obálky - o něco světlejší penumbry, která tvoří přechod mezi umbrou a okolní fotosférou. Životnost se pohybuje od několika hodin (u těch menších), přes několik dní, až po několik měsíců (u těch největších), přičemž větší skvrny způsobují pokles hodnoty solární konstanty o 0,1–0,25 %. Z pozorování a měření vyplývá, že největší pokles

v intenzitě slunečního záření nastává s příchodem nových oblastí slunečních skvrn, nebo s rychlým růstem těch stávajících (Bílek et al. 2006).

Dva protichůdné jevy, které způsobují pokles (sluneční skvrny) či nárůst (fakule) intenzity slunečního záření mají tendenci vzájemně eliminovat svůj vliv. Výsledkem jejich zvýšeného současného působení během slunečního maxima je mírný vzrůst intenzity záření (a tím i solární konstanty). Naopak během slunečního minima je slunečních skvrn i fakulí méně, což se odráží v mírném poklesu intenzity záření.

1.3. Proxy data

Intenzita slunečního záření, stejně jako teplota zemského povrchu se určuje přímým měřením. Pro zjišťování těchto údajů v obdobích před počátky přímého měření se používají údaje, které jsou odvozené z jiných měření. Jde tedy o soubory nepřímo stanovených hodnot, pro které se v odborné literatuře ujal název proxy.

Tradičními proxy daty sluneční aktivity jsou údaje o počtu slunečních skvrn, které se mění v jedenáctiletých slunečních cyklech. Tyto záznamy jsou k dispozici od 17. století. Pokud chceme jít dále do minulosti, je třeba použít sofistikovanější metody, jako je například zkoumání změn izotopu berylia ^{10}Be v sedimentech nebo v ledu. Tento izotop vzniká působením kosmického záření na atmosféru a rozpouští se v mírně kyselém prostředí srážkové vody. Po dopadu deště na zem se zvýší pH a ^{10}Be se vysráží. Čím intenzivnější je sluneční záření, tím více je tohoto izotopu ve srážkách (Kutílek, 2008).

Jako indikátory vývoje klimatu v historických obdobích se používá pestrá škála proxy dat. Změny teplot ledu se odvozují ze změn izotopů vodíku a kyslíku v ledu jádrových vrtů v ledovcích. Dále se provádějí pylové analýzy v neporušeném půdním krytu, ze kterých se

určí dominantní druhy rostlin ve zkoumaném historickém období. Z nich se potom usuzují klimatické poměry, především teplota a srážky. K odhadu teplot slouží také výzkum šířky a charakteristiky letokruhů stromů či velikost lišejníků. Povrchová teplota moře se stanoví z poměru izotopů v korálech a také změn v jejich chemického složení. Další klimatická proxy data poskytují změny ve vrstvičkách zvaných varve v ročních sedimentech na březích a dnu jezer, změny v růstu stalagmitů v krápníkových jeskyních a pedogeneze fosilních a pohřbených půd (Kutílek, 2008).

2. Měření solární konstanty

2.1. Rozdíly v satelitním měření solární konstanty

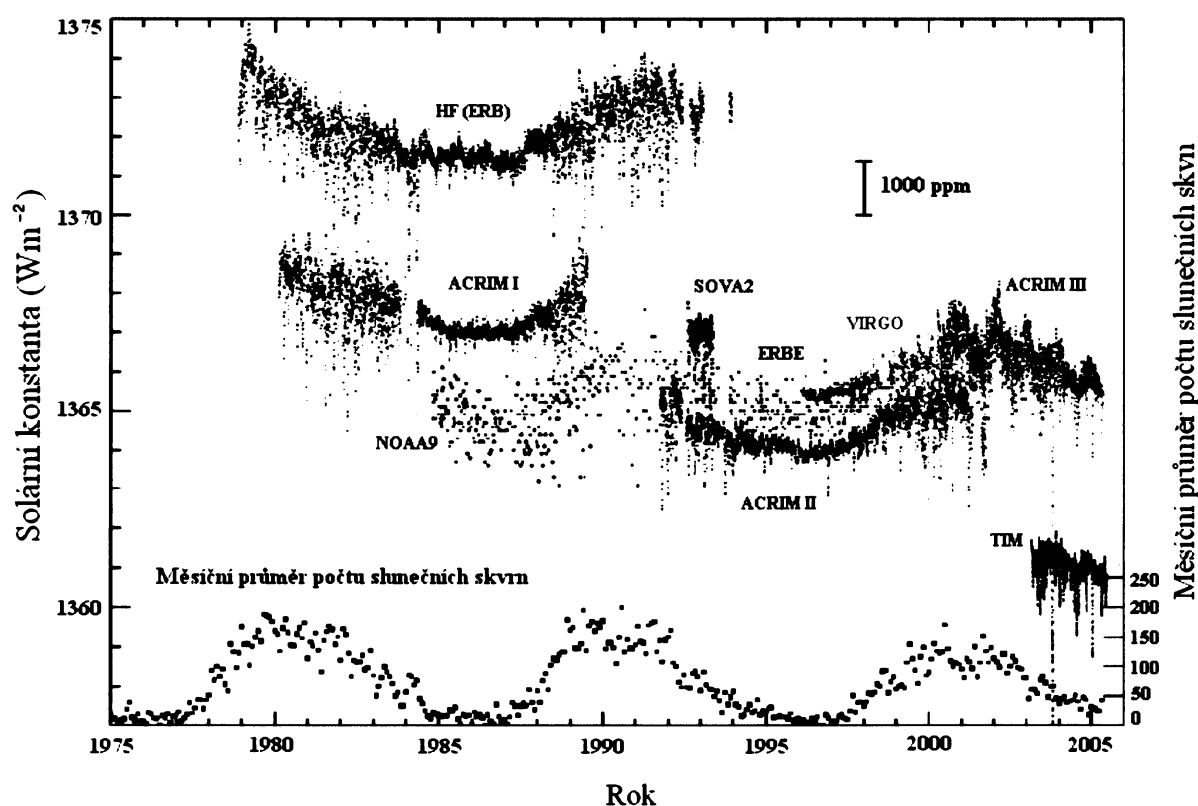
Slunce je předmětem lidského zájmu už od dávných dob, mnohými kulturami bylo dokonce uctíváno jako božstvo. V pozdějších dobách se lidé pokoušeli změřit intenzitu slunečního záření, které dopadá na zemský povrch. Měření ze zemského povrchu nebo z balónů však bylo velmi nepřesné, přičemž jedním z limitujících faktorů byla proměnlivost počasí. Až satelitní měření přineslo velké zlepšení přesnosti, jelikož se měří intenzita záření ještě předtím, než vstoupí do atmosféry.

Satelitní měření solární konstanty, které probíhá od 80. let 20. století, není bez komplikací. Za dobu, po kterou měření probíhají, se vystřídal několik různých přístrojů na oběžné dráze Země, které měřily solární konstantu. Hodnoty naměřené různými přístroji pro stejné období však nejsou na stejné úrovni, jsou mezi nimi nezanedbatelné rozdíly. Důvody tohoto nesouladu byly hledány např. v roce 2005 na půdě National Institute of Standards and Technology (NIST) v Gaithersburgu ve státě Maryland (USA). Za tímto účelem byly zkoumány a diskutovány konstrukční plány přístrojů, jejich kalibrace a možnosti uvedení na stejnou úroveň. Mezi zkoumané přístroje patřily Active Cavity Radiometer Irradiance Monitor III (ACRIM III) na satelitu ACRIMSAT, Total Irradiance Monitor (TIM) na satelitu SORCE, the Variability of solar Irradiance and Gravity Oscillations (VIRGO) na Solar and Heliospheric Observatory (SOHO) a the Earth Radiation Budget Experiment (ERBE) na satelitu ERBS. Prezentace každého z nich obsahovala popis jeho konstrukce a mechanismu měření, bilanci nejistot (uncertainty budget) a metody použité k vyhodnocení vlivu stárnutí přístrojů na oběžné dráze a s tím spojené ztráty původních vlastností. Také byly přístrojů



na satelitech porovnány s těmi, které jsou umístěny na zemském povrchu. Pozornost byla upřena hlavně na vliv rozptylu světla a měření velikosti průzoru přístrojů. Při laboratorním porovnávání přístrojů jsou jako standard brána měření optického výkonu a měření pomocí kryogenních radiometrů, které porovnávají tepelné účinky měřeného optického záření s tepelnými účinky elektrického proudu (Butler et al. 2008).

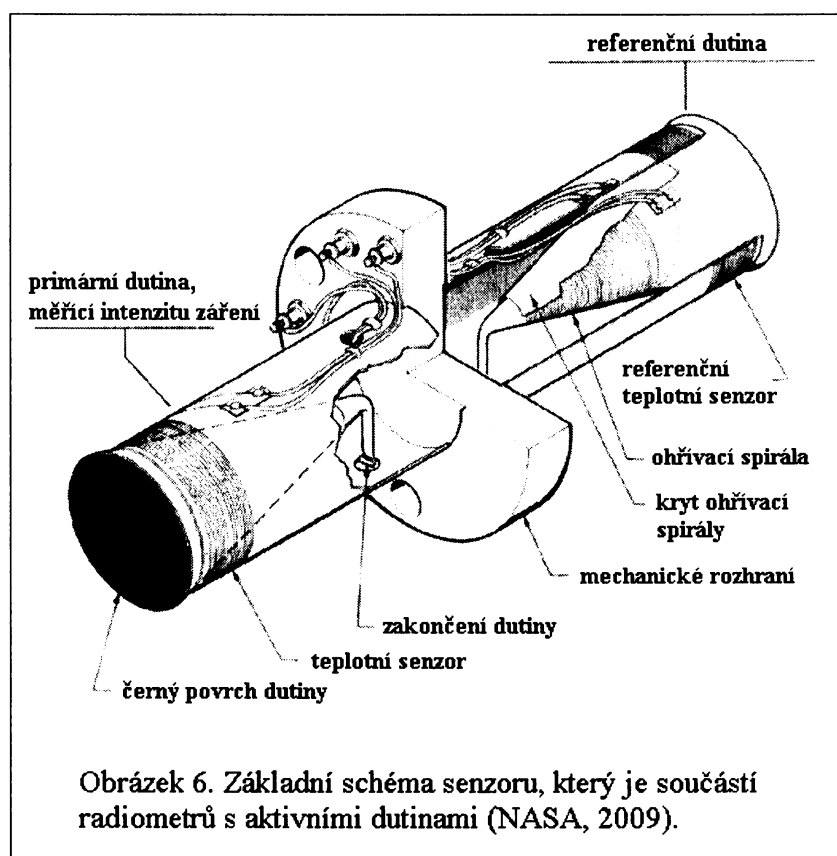
Jak je vidět na obrázku 5, rozpětí hodnot solární konstanty, které byly naměřeny různými radiometry, činí asi 5 Wm^{-2} (asi 0,35%). Tento rozdíl je větší, než standardní nejistota měření většiny těchto přístrojů (viz. kapitola 2.3.) a taktéž větší než 0,02% za dekádu, což je hodnota často uváděná jako potřebná ke způsobení klimatických změn. Nesoulad mezi různými přístroji během stejného období ukazuje na přítomnost neznámého permanentně působícího faktoru (Kopp et al. 2005).



Obrázek 5. Denní průměrné hodnoty solární konstanty naměřené pomocí přístrojů na satelitech. Za povšimnutí stojí, že v roce 2005 byla hodnota solární konstanty, naměřená radiometrem TIM, přibližně 1361 Wm^{-2} , zatímco ACRIM III a VIRGO (DIARAD + PMO6V) naměřily ve stejný čas hodnotu přibližně 1366 Wm^{-2} (Butler et al. 2008).

2.2. Radiometry s aktivními dutinami

Všechny přístroje, které momentálně měří intenzitu slunečního záření na oběžné dráze Země, používají stejnou metodu a to měření pomocí radiometru s aktivními dutinami (active cavity radiometer), což je speciální typ pyrhelionometru (přístroje měřícího přímé sluneční záření). Základní schéma konstrukce senzoru, který je používán v radiometrech ACRIM, je zobrazeno na obrázku 6.



Kruhový vstupní průzor radiometrů, mající obvykle 5 až 8 mm v průměru, definuje svazek paprsků slunečního záření, který je následně absorbován v černé, kovové, tepelně izolované dutině. Přístroj aktivně kontroluje rozdíl teplot mezi touto absorpční dutinou a jinou, neosvětlenou referenční dutinou a měří elektrickou energii, potřebnou k vyrovnání

tohoto rozdílu. Až na několik poměrně malých (obecně pod 1%) korekcí nám toto měření poskytuje hodnotu solární konstanty (NIST, 2009).

Technické rozdíly mezi zkoumanými radiometry spočívají v detailech jako je odlišné množství dutin a jejich tvar, odlišné materiály pokrývající dutiny, elektronika, frekvence měření, algoritmy redukující data, proces kalibrace a výška oběžné dráhy. Tyto rozdíly byly diskutovány a označeny jako potenciální zdroj hledaného rozdílu. Nepochybně existuje celá řada dalších malých rozdílů v konstrukci radiometrů, ty se však zdají být nepodstatnými při řešení této otázky (Butler et al. 2008).

Jak již bylo řečeno, povrchová úprava a tvar dutin se liší u jednotlivých radiometrů. Přístroje jako ACRIM nebo ERBE, používají nátěr dutin lesklou černou barvou a tvar dutin mají uzpůsobený k zachycení odražených paprsků. Pro VIRGO a PMO6V byl použit obrácený kužel pokrytý opět černou lesklou barvou a dutiny přístroje DIARAD jsou natřeny matnou černou barvou. Dutiny radiometru TIM byly jako první u orbitálních radiometrů potaženy kovově černou, nikelnato – fosforovou (NiP) hmotou, která je odolnější proti ultrafialovému záření než nátěr černou barvou. Tato hmota má matný povrch a velmi nízké albedo (přibližně 0,02%). Hlavním účelem speciálního tvaru dutiny je zmenšení prostorového úhlu rozptýleného záření, které by po prvním odrazu směřovalo ven z dutiny. Toto je zásadní vlastnost, která limituje míru odrazivosti dutiny, přičemž nezáleží na tom, jestli je povrch matný nebo lesklý. Součástí projektu ACRIM bylo i měření odrazivosti některých dutin a tým kolem projektu TIM věnoval měření odrazivosti značné množství času ještě před dopravením na oběžnou dráhu, na oběžné dráze pak byla zkoumána přeměna energie záření na teplo za použití fotodiod. Jelikož byla konstrukce dutin použitých radiometrů pečlivě promyšlena, uskutečnila se řada měření odrazivosti, a patřičné korekce již byly správně učiněny, je pravděpodobné, že rozdíly v konstrukci dutin a materiálu jejich povrchu nejsou zodpovědné za rozdíly v naměřených hodnotách solární konstanty, které činí asi 0,35% (Kopp et al. 2005).

Děje na okrajích průzorů mohou být taktéž odlišné u různých radiometrů. Této záležitosti bylo zatím věnováno poměrně málo pozornosti, kromě poznatku, že tyto okraje jsou u radiometru TIM evidentně poměrně ostré. Z jednoho hlediska by měl mít ideální průzor velmi ostré okraje. Jakákoli tupost či plochá část by vytvořila povrch na vnitřní straně průzoru, který by dovolil paprskům odrazet se dovnitř dutiny místo toho, aby byly jasně vyloučeny z měření. To může vést k těžce řešitelným problémům s analyzováním rozptylu a také to činí obsah plochy průzoru těžce měřitelným pomocí optických metod. S jiným úhlem pohledu přišel Claus Frolich z týmu VIRGO PMO6V. Všiml si toho, že velmi ostrý okraj průzoru musí být velmi tenký a tím i náchylný k ohřívání dopadajícím slunečním zářením. To dává za vznik nežádoucímu infračervenému záření emitovanému materiálem průzoru a absorbovanému uvnitř dutiny (NIST, 2009).

Konečně snad poslední významný rozdíl je ve způsobu, jak se různé týmy vypořádávají s degradací materiálů během měření na oběžné dráze, která znamená hlavně změnu odrazivosti. Obecný přístup k řešení tohoto problému spočívá v průběžném srovnávacím měření na oběžné dráze. To se týká srovnávání různě vytížených dutin u stejného přístroje nebo rozdílných senzorů na oběžné dráze ve stejném čase. Zdroje degradace mohou souviset s expozicí slunečnímu záření. To se týká například změn v odrazivosti dutiny nebo degradace materiálu vlivem tepla z absorbovaného záření. Jiné zdroje s expozicí nesouvisí. Mezi ně patří vliv přesunu přístroje ze zemské atmosféry do vakua, vliv vesmírného prostředí, nebo prostě jen omezená životnost materiálu. Tyto vlivy mohou vést ke změnám v ploše průzoru a v tepelné vodivosti (Kopp et al. 2005).

Jelikož se přístroje na oběžné dráze nedají opravovat a je velmi těžké simulovat provozní podmínky laboratorně, je problematické kvantifikovat a korigovat vliv degradace. Odhady se pohybují mezi „absencí dlouhodobé degradace“ (ERBE) a 0,29% za rok (PMO6V). Jak se program měření solární konstanty vyvíjí, měřicí přístroje se stávají více

sofistikovanými a předem počítají s orbitální degradací. Zakomponování tří nebo více identických dutin umožňuje srovnávání s dutinou, která je minimálně exponovaná. Projekt TIM pak představil koncept nezávislého monitoringu odrazivosti dutin za použití silikonových fotodiod a tato data se taktéž ukázala být velmi užitečná (Butler et al. 2008).

2.3. Nejistota měření

Jedním z hlavních předpokladů při hledání příčin rozdílů v měření je mít k dispozici seznam bilancí nejistot zkoumaných radiometrů. Bez těchto odhadů nejistoty pro každý přístroj zůstává nejisté, zda se pozorované rozdíly v měření hodnoty solární konstanty vymyká těmto nejistotám měření.

Nejistotou měření se rozumí k výsledku měření přidružený parametr charakterizující rozptýlení hodnot veličiny, která je objektem měření. Základní kvantitativní charakteristikou nejistoty je tzv. standardní nejistota, což je směrodatná odchylka veličiny, pro kterou je nejistota udávána. Pro sumaci standardních nejistot se používá tzv. kombinovaná standardní nejistota, která se rovná druhé odmocnině ze součtu čtverců (druhých mocnin) jednotlivých standardních nejistot. (Sedláček, 2006).

Seznam hodnot standardních nejistot pro jednotlivé děje ovlivňující měření solární konstanty a hodnoty celkové nejistoty pro některé radiometry jsou uvedeny v tabulce 1. Hodnota vlivu degradace materiálu odpovídá stáří mise. Pro většinu přístrojů činí odhadovaná míra nejistoty méně než 0,1%. Hodnoty nejistot, uvedené v tabulce 1, však nemusí být nutně správné, jelikož se v mnoha případech jedná o odhady a některé faktory zřejmě nebyly vzaty v úvahu. Celkové vyznění je však takové, že i kdyby některé vlivy byly podceněné, je

nepravděpodobné že by pozorovaný 0,35% rozdíl spadl do rozpětí daného nejistotou měření (Kopp et al. 2005).

Tabulka 1. Hodnoty standardních nejistot (směrodatných odchylek) pro jednotlivé procesy či děje, ovlivňující měření pomocí radiometrů a kombinovaná standardní nejistota, určená jako odmocnina ze součtu druhých mocnin jednotlivých nejistot. Hodnoty jsou udávány v ppm ($\times 10^{-6}$). Označení „N/R“ znamená nezjištěný (Butler et al. 2008).

Radiometr	ACRIM III	ERBE	DIARAD	PMO6V	TIM
Měření plochy průzoru	280	833	400	501	30
Ohyb světla	1295	200	N/R	100	47
Tepelné pozadí	N/R	33	N/R	N/R	10
Rozptyl světla	N/R	N/R	N/R	100	25
Korekce na 1AU	0,1	33	N/R	N/R	0,1
Degradace materiálu	12	N/R	73	87	10
Kombinovaná standardní nejistota	1359,8	1005,0	563,8	771,0	205,8

Jelikož má většina přístrojů několik různých dutin, které současně měří sluneční záření, je možné sledovat rozdíl naměřených hodnot u různých dutin téhož instrumentu (tab. 2). Hodnoty "udávané nejistoty", uvedené v tabulce 2, byly určeny konstrukčními týmy jednotlivých radiometrů. Hodnoty označené jako "variance dutin" pak činí jednu polovinu z maximálního rozdílu mezi dvěma dutinami na tomtéž přístroji. V některých případech rozdíly mezi dutinami značně překročily očekávané hodnoty. To nasvědčuje faktu, že hodnoty nejistot v tabulce 1 jsou pravděpodobně podceněné (Kopp et al. 2006).

Tabulka 2. Udávané nejistoty porovnané a pozorované variace dutin. Pro ACRIM II a ACRIM III byla určena nejistota odhadnuta z variací dutin. „N/A“ znamená neaplikovatelný. (Butler et al. 2008).

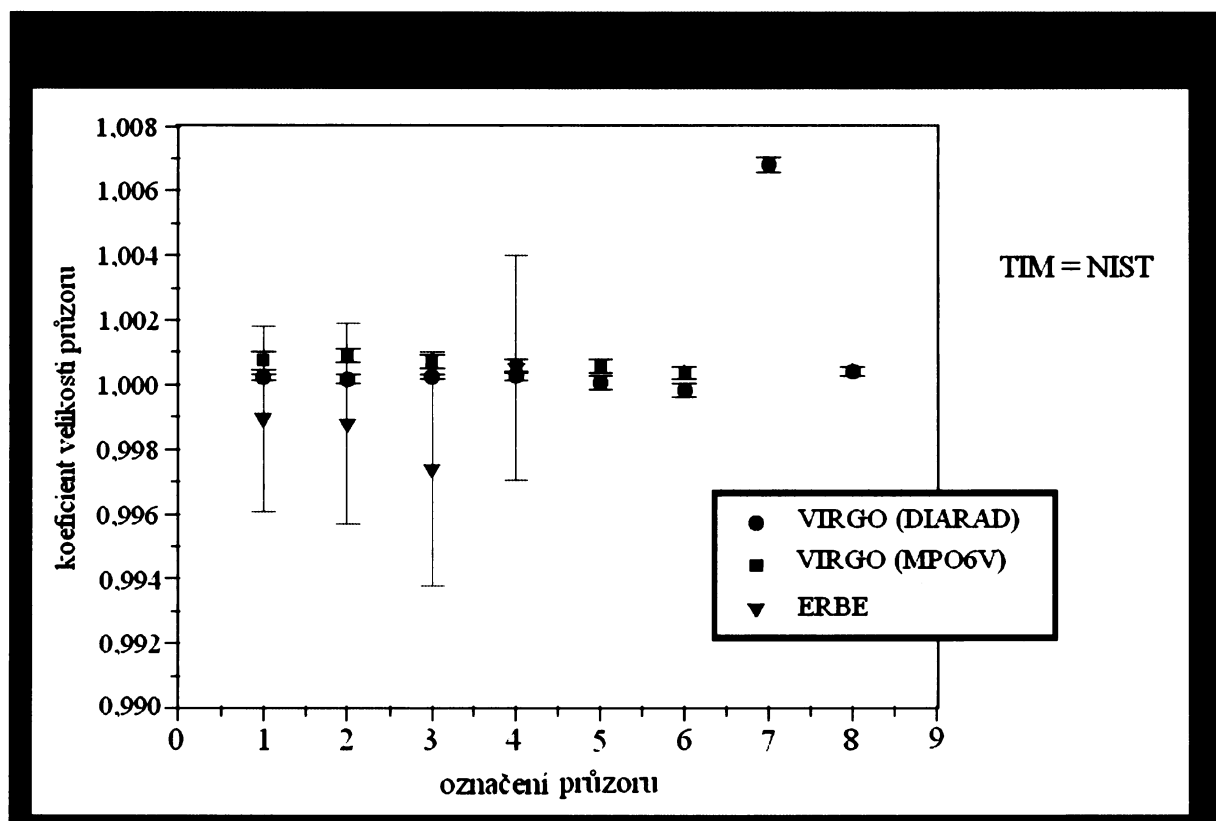
přístroj	průměrná hodnota solární konstanty (Wm^{-2})	udávaná nejistota (ppm)	variace dutin (ppm)
HF (ERB)	1371,9	5000	N/A
ACRIM I	1367,5	1000	510
ACRIM II	1364,2	2000	2045
ACRIM III	1366,1	1000	1034
ERBE	1365,2	833	N/A
VIRGO-PMO6V	1365,7	1204	316
VIRGO-DIARAD	1366,4	470	2100
TIM	1361,0	350	266

2.4. Potenciální zdroje chyb

2.4.1. Velikost průzoru

Velikost vstupního průzoru dutiny definuje průměr svazku světelných paprsků, který do ní vstupuje. Obsah jeho plochy je proto třeba znát s velkou přesností. Proces měření této plochy se nabízí jako potenciální zdroj chyb a mnohými je označován jako faktor zodpovědný za pozorovaný rozdíl mezi radiometry. Tomu nicméně nenasvědčují první výsledky současného výzkumu, porovnávaného měření plochy průzoru (obrázek 7). Třebaže to není patrné na první pohled, na údaje z obr. 7 může být nahlíženo jako na nejlepší dostupné

srovnání ploch průzorů mezi radiometry VIRGO a TIM. Je tomu tak proto, že TIM byl před vynesemím na oběžnou dráhu kalibrován přímo proti škále NIST, za použití stejných měřicích postupů, jaké byly následovně použity pro srovnání s VIRGO. Jak je vidět na obrázku 7, velikosti průzorů VIRGO nesouhlasí se škálou NIST a tím ani se škálou TIM, ovšem ne o víc než o 0,1%. Navíc směr odchylek je opačný k tomu, který by mohl vysvětlovat rozdíl 0,35% mezi VIRGO a TIM, který byl ukázán na obr. 5. Na základě těchto dostupných údajů není pravděpodobné, že by naměřené rozdíly solární konstanty byly způsobené nepřesnostmi v měření plochy průzoru (Kopp et al. 2006).



Obrázek 7. Výsledky porovnávání plochy průzorů. Svislá osa udává poměr předpokládaných, laboratorně naměřených hodnot obsahů plochy průzoru k hodnotám, naměřeným pro tentýž průzor v NIST. U každé hodnoty je znázorněno rozpětí dané dvojnásobkem směrodatné odchylky měření (NIST, 2009).

2.4.2. Ohyb světla

Výsledky propočtů, které se zabývaly vlivem ohybu světla na okrajích průzorů radiometrů, prezentoval Eric Shirley z NISTu. Souhrn výsledků je uveden v tabulce 3. Korekce, které mají eliminovat tento vliv, se provádějí tak, že se obsah plochy průzoru vynásobí korekčním činitelem, uvedeným v tabulce 3. Korekční činitel u radiometru TIM je narozdíl od ostatních přístrojů menší než 1 (opačný směr). Tyto korekce byly použity na data radiometru TIM a jiné, nezávisle vypočítané korekční činitele, které však dobře souhlasí s daty z tabulky 3, byly aplikovány na data radiometrů PMO6V a DIARAD (oba VIRGO). Nicméně tyto korekce nebyly učiněny u ERBE a ACRIM III. Pokud by byly aplikovány například na ACRIM III, snížilo by to hodnotu naměřených dat asi o 0,13%, což by znamenalo, že by tato data ležela zhruba v poloviční vzdálenosti mezi VIRGO a TIM. Ohyb světla tak může vysvětlit jednu třetinu rozdílu mezi radiometry TIM a ACRIM, ale nevysvětluje rozdíl mezi TIM a VIRGO (Butler et al. 2008).

Tabulka 3. Propočty NIST ohledně vlivu ohybu světla na měření solární konstanty. Uvedenými korekcemi se násobí plocha průzoru. Slunce je spektrálně modelováno jako černé těleso o teplotě 5900 K. R_a je poloměr čelního průzoru (bližšího ke Slunci), R_d je poloměr zadního průzoru a d_d je vzdálenost mezi oběma průzory (Butler et al. 2008).

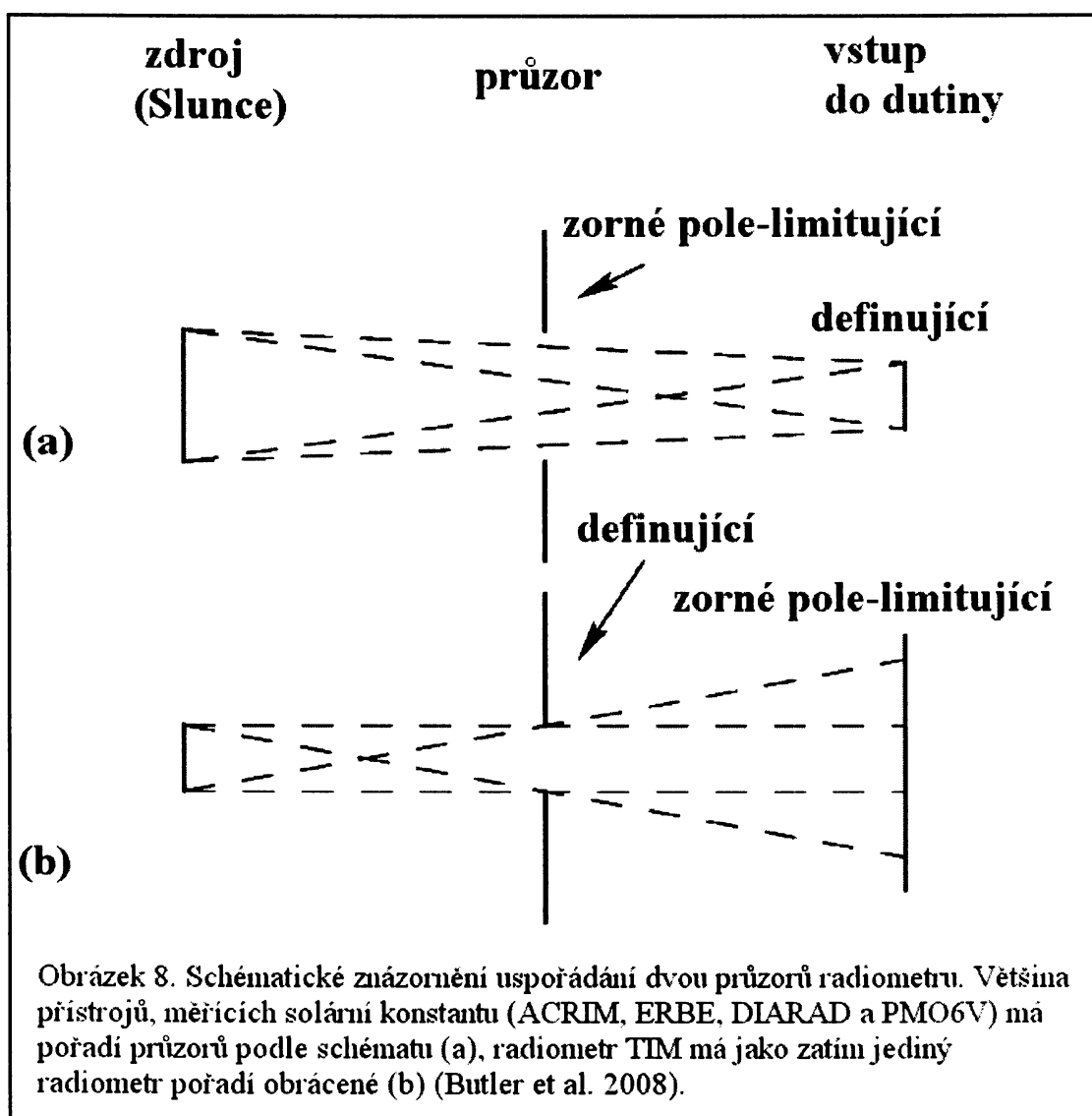
přístroj	R_a (mm)	d_d (mm)	R_d (mm)	korekce	korekce učiněna?
PMO6V	4,25	95,4	2,5	1,001280	ANO
DIARAD	6,52	144	4,0015	1,000833	ANO
ERBE	12,09	100,8	4,039	1,000209	NE
ACRIM III					
Senzor 1	6,6548	150,4696	3,9878	1,000828	
Senzor 2	6,3119	76,3524	3,9878	1,000466	

celkem				1,001295	NE
TIM	3,9894	101,6	7,62	0,999582	ANO

2.4.3. Rozptyl světla

Předtím, než je změřena energie světla v dutině radiometru, musí projít dvěma kruhovými průzory. Jeden z nich má větší průměr, jeho funkcí je určovat prostorový úhel pohledu radiometru a je nazýván "zorné pole-limitující průzor". Druhý z nich, označovaný jako "definující průzor" je menší a určuje průměr svazku slunečních paprsků, který je vpuštěn do dutiny radiometrů. Pořadí definujícího a zorné pole-limitujícího průzoru má radiometr TIM opačné oproti ostatním radiometrům (obr. 8). Při uspořádání, které používá většina přístrojů (obr. 8a), jsou oba průzory ozářeny světlem, avšak pouze část paprsků, které vstupují do zorné pole-limitujícího průzoru, vstupuje také do definujícího průzoru a je změřena. Zbytek paprsků musí být zachycen pohlcovači, které jsou umístěny mezi průzory. Nicméně určitá malá část tohoto záření se rozptýlí na povrchu pohlcovačů a vstoupí do definujícího průzoru, kde se jejich energie připočte k energii přímého záření. Tento efekt, pokud není korigován, vede k situaci kdy přístroje s uspořádáním z obr. 8a) nadhodnocují intenzitu slunečního záření v porovnání s radiometrem TIM. Je tomu tak proto, že u přístrojů s konfigurací podle obr. 8b) veškeré sluneční paprsky prochází oběma průzory, takže pohlcovače mezi nimi nejsou ozářeny slunečním světlem a nehrozí u nich problém s rozptylem. Jelikož TIM je jediný přístroj, který používá konfiguraci na obr. 8b), zatímco všechny ostatní přístroje mají konfiguraci na obr. 8a), mohl by tento efekt alespoň z části vysvětlovat pozorovaný rozdíl mezi hodnotami solární konstanty. Není však jasné do jaké míry se tak může dít, protože konstrukční týmy některých radiometrů deklarovaly, že již

učinily korekce kvůli rozptylu světla v jejich přístrojích. Není však jasné, zda se týkaly tohoto specifického rozptylu. Obecně bylo uznáno, že v případě rozptylu záření nebyly učiněny jednotné korekce jako v případě ohybu světla. Také bylo konstatováno, že v praxi by dosažení správných korekcí mohlo být daleko složitější než u ohybu světla, jelikož rozptylové vlastnosti pohlcovačů a materiálu průzorů nemusí být dostatečně známé (Butler et al. 2008).



2.4.4. Tepelné pozadí

Pokud je clona radiometru zavřená, v dutině se stále vyskytuje tepelné záření, emitované zadní stranou clony, průzorem, pohlcovači, atd. Toto tzv. tepelné pozadí je nežádoucí, jelikož se takto vyzářená energie při měření přičítá k přímému slunečnímu záření. Korekce tohoto jevu vychází u některých přístrojů (např. ACRIM) primárně z teplotního modelu přístroje, případně podpořeného jednorázovým měřením, zatímco u jiných přístrojů (TIM) se provádí častá, pravidelně se opakující měření. Radiometr TIM měří tento efekt tak, že se přístroj obrátí směrem do hlubokého vesmíru, kde s otevřenou clonou naměří efektivní nulu a poté přímo změří tepelné pozadí se zavřenou clonou. Není nicméně jasné, jak se různé způsoby vypořádání se s tímto jevem projevují na rozdílech v naměřených hodnotách solární konstanty u jednotlivých radiometrů a tím pádem je značně nejisté i to, jestli může být tento jev zodpovědný za 0,35% rozdíl v měření (Kopp et al. 2006).

2.4.5. Jouleovo teplo

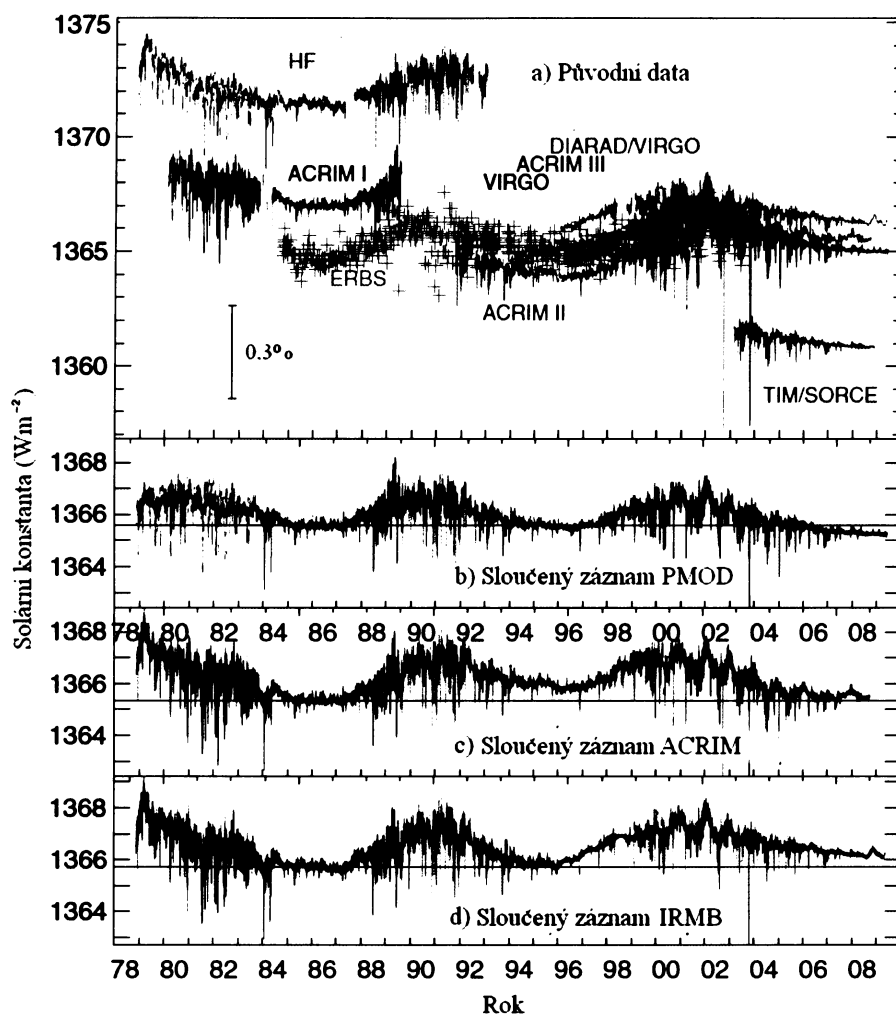
Dalším potenciálním zdrojem chyb měření, který zatím nebyl příliš diskutován, je Jouleovo teplo, které vzniká v elektrickém vedení substitučního ohříváče. Jde o přeměnu elektrické energie na vnitřní energii. Zahřívání vodiče lze vysvětlit předáváním části kinetické energie částic způsobujících elektrický proud (elektronů) částicím, které se elektrického proudu neúčastní (nejčastěji kladné ionty v pevných pozicích). Tím se zvyšuje tepelný pohyb těchto částic a vodič se zahřívá (Wikipedia, 2009). Určitá část tohoto uvolněného tepla projde dutinou předtím, než je odvedena chladičem, zatímco zbylá část jde přímo do chladiče. Proto

je u všech radiometrů měřících solární konstantu nezbytná korekce pro tu část energie, která je změřena, ale uniká do chladiče. Zajímavostí je, že elektrické substituční radiometry znamenaly před třiceti lety revoluci v měření právě proto, že u nich lze použít supravodiče, ve kterých Jouleovo teplo nevzniká (Butler et al. 2008).

2.5. Tvorba sloučených záznamů solární konstanty

Jelikož se nepodařilo různé přístroje kalibrovat na stejnou úroveň, jejich měření často ukazují rozdílné hodnoty pro stejné období. Aby bylo dosaženo souvislého záznamu hodnot solární konstanty v čase, přistoupilo se k umělému posunutí naměřených údajů z jednotlivých přístrojů tak, aby na sebe navazovaly (obr. 9). Tyto složené série dat, které jsou v anglické literatuře označeny termínem "solar constant composite" jsou zde z nedostatku českého ekvivalentu nazývány jako sloučené záznamy solární konstanty.

Tři konkurenční sloučené záznamy solární konstanty PMOD, ACRIM a IRMB se liší použitými daty a s nimi souvisejícím trendem hodnot. Sloučené záznamy ACRIM a IRMB používají původní data, zatímco pro PMOD byly provedeny korekce dat kvůli jevům, které nebyly vzaty dříve v úvahu. Už v první verzi sloučeného záznamu PMOD byly představeny korekce kvůli degradaci materiálu u nejstaršího z radiometrů, HF na satelitu Nimbus 7. Stejně tak byla upravena data z prvního roku přístroje ACRIM I. Tyto dva soubory dat se zmíněnými korekcemi vytvořily základ sloučeného záznamu PMOD. V roce 2006 byly korekce u přístroje HF přehodnoceny a nově upravená data HF obsahují korekce kvůli degradaci a dlouhodobému nárůstu citlivosti po celou dobu mise satelitu Nimbus 7 od listopadu 1978 do ledna 1993 (Fröhlich, 2007).

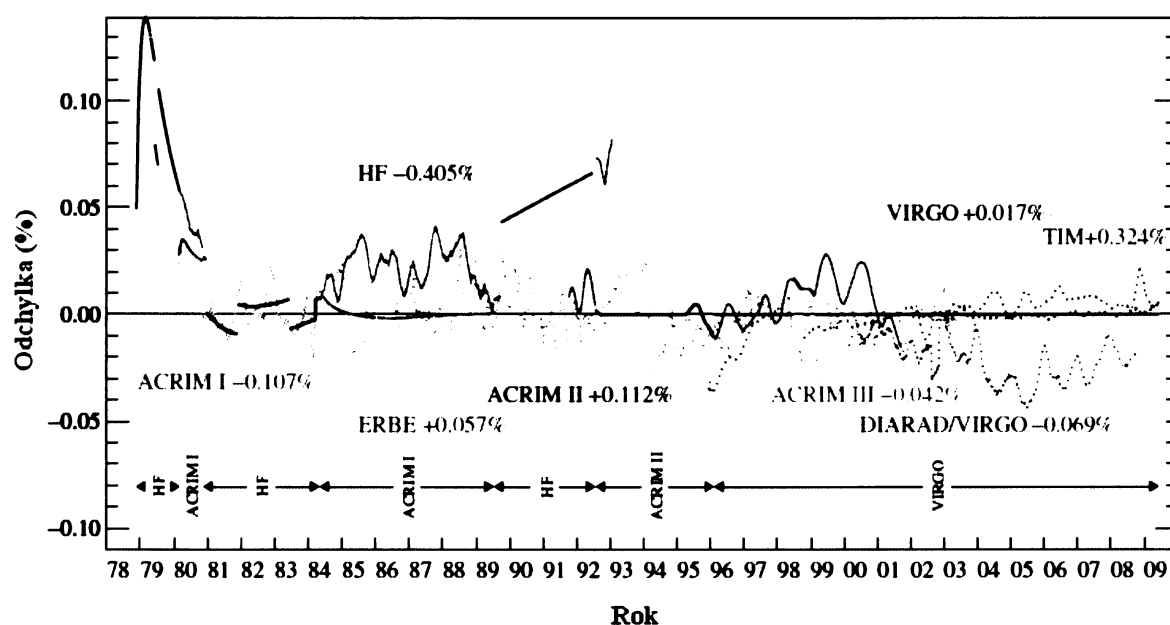


Obrázek 9. Horní panel: Porovnání denně zprůměrovaných hodnot solární konstanty, naměřených radiometry na různých satelitech od listopadu 1978: radiometr HF na satelitu Nimbus 7, ACRIM I na satelitu SMM, Erbe na ERBS, ACRIM II na UARS, VIRGO na SOHO, ACRIM na satelitu ACRIM-Sat a TIM na SORCE. Spodní panely: Odlišné sloučené záznamy solární konstanty PMOD, ACRIM a IRMB, jako denní data zakreslená v různých barvách, které označují jejich původ (Fröhlich, 2006).

Jedním z největších problémů při konstrukci všech sloučených záznamů byl způsob jak překlenout takzvanou "ACRIM mezeru" mezi koncem mise ACRIM I a startem ACRIM II od června 1989 do října 1991, kterou způsobila katastrofa raketoplánu Challenger. Pro toto období jsou k dispozici denní hodnoty z HF a dále asi 70 hodnot z ERBE, měřených každých 14 dní. Zatímco sloučený záznam PMOD používá pro toto období korigovaná HF data, ve sloučeném záznamu ACRIM jsou korekce ignorovány. U sloučeného záznamu IRMB byla pro překlenutí ACRIM mezery využita data ERBE, což mělo za následek že, podobně jako u

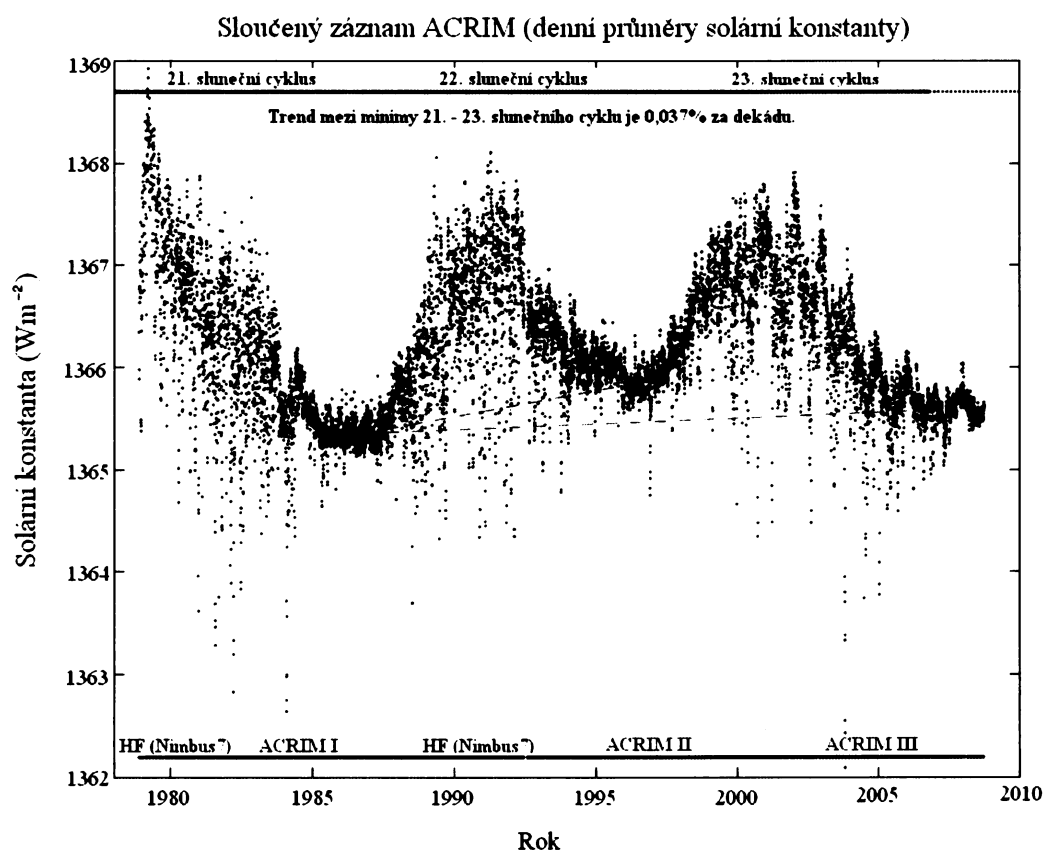
sloučeného záznamu PMOD, je rozdíl mezi minimy v letech 1986 a 1996 neznatelný (Fröhlich, 2006).

Pro období po roce 1996 jsou do sloučeného záznamu PMOD zakomponována data VIRGO, která jsou aktualizována až do současnosti. ACRIM používá pro stejné období kombinaci dat z měření ACRIM II a ACRIM III. Ve sloučeném záznamu IRMB jsou použita DIARAD/VIRGO data, tedy hodnoty naměřené pouze samotným přístrojem DIARAD, jedním z přístrojů VIRGO na satelitu SOHO. Tato data jsou odlišná od oficiálních dat VIRGO především proto, že nebyly korigovány kvůli samovolnému růstu citlivosti. Porovnání upravených dat, použitých ve sloučeném záznamu PMOD, s původními daty ukazuje obrázek 10, na kterém jsou jasně vidět největší korekce: u ranných dat HF, ACRIM I během roku 1980 a data HF během "ACRIM mezery" (Fröhlich, 2007).



Obrázek 10. Porovnání sloučeného záznamu PMOD s původními datovými řadami. Hladké, plné čáry značí, že data dotyčného radiometru jsou použita jako základ sloučeného záznamu. Pokud je křivka shodná s vodorovnou osou udávající nulu, znamená to, že nebyly učiněny žádné korekce kromě celkového posunu, jehož velikost je poznamenána za názvy radiometrů. Části datových řad, které nejsou ve sloučeném záznamu použity, jsou označeny tlumenou barvou křivky. Data naměřená přístroji ERBE, DIARAD/VIRGO a TIM/SORCE jsou vyznačeny čárkovaně (Fröhlich, 2006).

Máme tedy k dispozici tři rozdílné sloučené záznamy solární konstanty, přičemž nelze jednoduše říct, který z nich lépe odpovídá realitě. Pokud hledáme vzestupný trend solární konstanty, který by se mohl podílet na předpokládaném vzrůstu globální povrchové teploty, můžeme takový trend nalézt u sloučeného záznamu ACRIM (obr. 11). Mezi minimy 21. a 23. slunečního cyklu se zde objevuje vzestupný trend asi $0,505 \text{ Wm}^{-2}$ za dekádu. Pokud použijeme stejnou úvahu jako v kapitole 1.1., pak zemskej na zemskej povrchu by tento rozdíl znamenal přibližně $0,09 \text{ Wm}^{-2}$. Klimatický vliv této hodnoty lze analogicky s odhadem Christiansena (2005) zhruba odhadnout na změnu globální teploty o $0,05 - 0,08 \text{ }^\circ\text{C}$ za dekádu. Tento trend (pokud skutečně existuje) nemůže vysvětlit údajné zvyšování globální teploty v tomto období, které podle IPCC činí přibližně $0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ za dekádu.



Obrázek 11. Průběh posledních tří slunečních cyklů, zachycený jako denní průměry hodnot solární konstanty sloučeného záznamu ACRIM. Tento sloučený záznam používá jako základ data z přístrojů ACRIM I, ACRIM II a ACRIM III. Na překlenutí období, kdy nejsou data ACRIM k dispozici jsou použita data z přístroje HF na satelitu Nimbus⁷ (Fröhlich, 2006).

3. Průměrná globální teplota

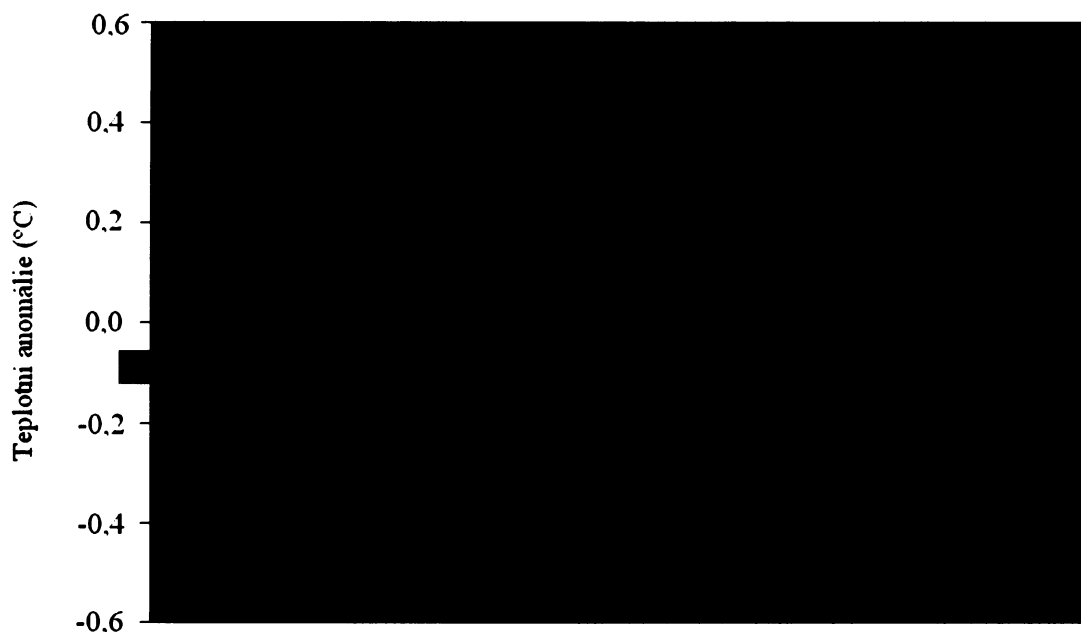
3.1. Koncept průměrné globální teploty

Hrozba "globálního oteplování" je většinou společností přijímána zcela automaticky, přestože málokdo asi pocítuje vliv oteplení na vlastní kůži. Každý však určitě někdy viděl graf zobrazující strmý růst "globální teploty" v průběhu posledních desetiletí. Nejčastěji je průběh globální teploty zobrazován ve formě tzv. teplotních odchylek (anomálií), což znamená, že hodnoty jsou přepočteny tak, aby průměr za určité (např. 30 leté) období byl roven nule. Prezentují se obvykle v podobě sloupcového grafu, kde jsou záporné hodnoty směřovány dolů a kladné nahoru. Takový graf je zobrazen na obr. 12. Tento graf je současně ukázkou, jak volba typu grafu může ovlivnit dojem, který tento graf vyvolá. V tomto případě bije do očí červená plocha vlevo dole a rychlý růst výšky sloupců zcela vpravo. Pokud graf překreslíme do podoby grafu bodového (obr. 13), kde hodnoty teploty jsou vyneseny jako body a jsou spojeny hladkou čarou, bude první dojem jiný. Do popředí vynikne značné kolísání hodnot z roku na rok, ovšem i přes tento velký rozptyl je celkový růst teploty zřejmý (Střeščík, 2007).

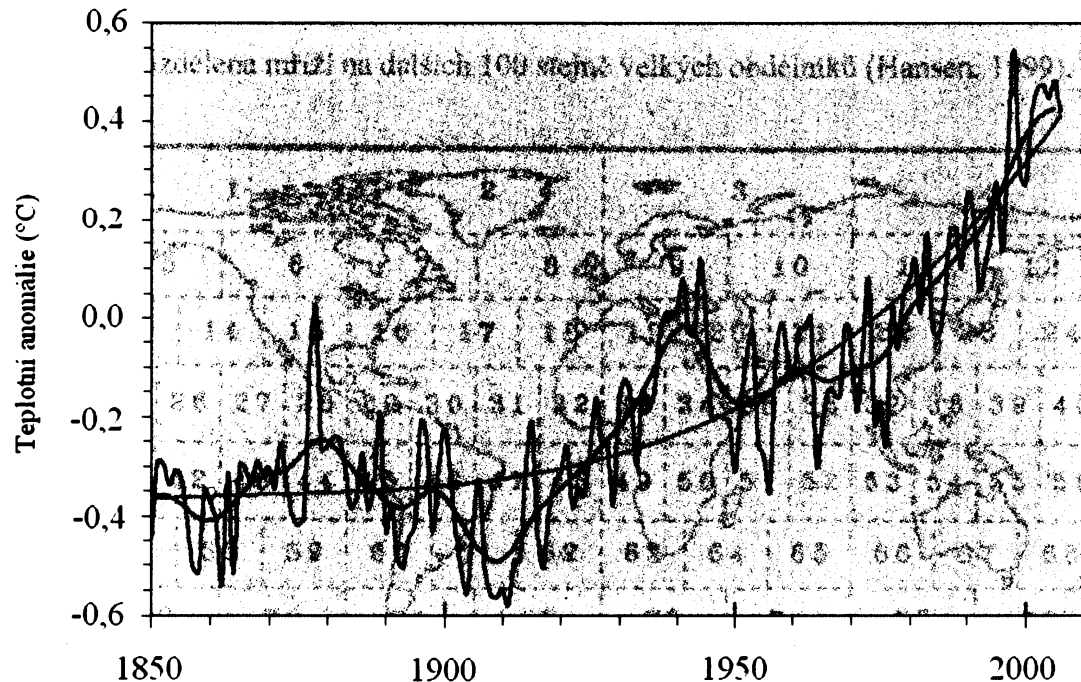
Význam grafů je tedy jasný: globální teplota vzrůstá. Otázkou však zůstává, jak se ona hodnota "průměrné globální teploty" získává a jaká je její spolehlivost. Země samozřejmě nemá jedinou teplotu, která by ji mohla reprezentovat jako celek. Průměrná globální teplota je koncept vytvořený člověkem za účelem sledování trendu globálního klimatu, nicméně tento koncept má mnoho slabín. **Hodnota globální teploty představuje současně prostorový a časový průměr.** Jediná hodnota představuje průměr hodnot naměřených na více než 7000

meteorologických stanicích, které jsou velmi nerovnoměrně rozmístěny po zemském povrchu.

Takový průměr může reflektovat skutečnou situaci jen velmi nepřesně.



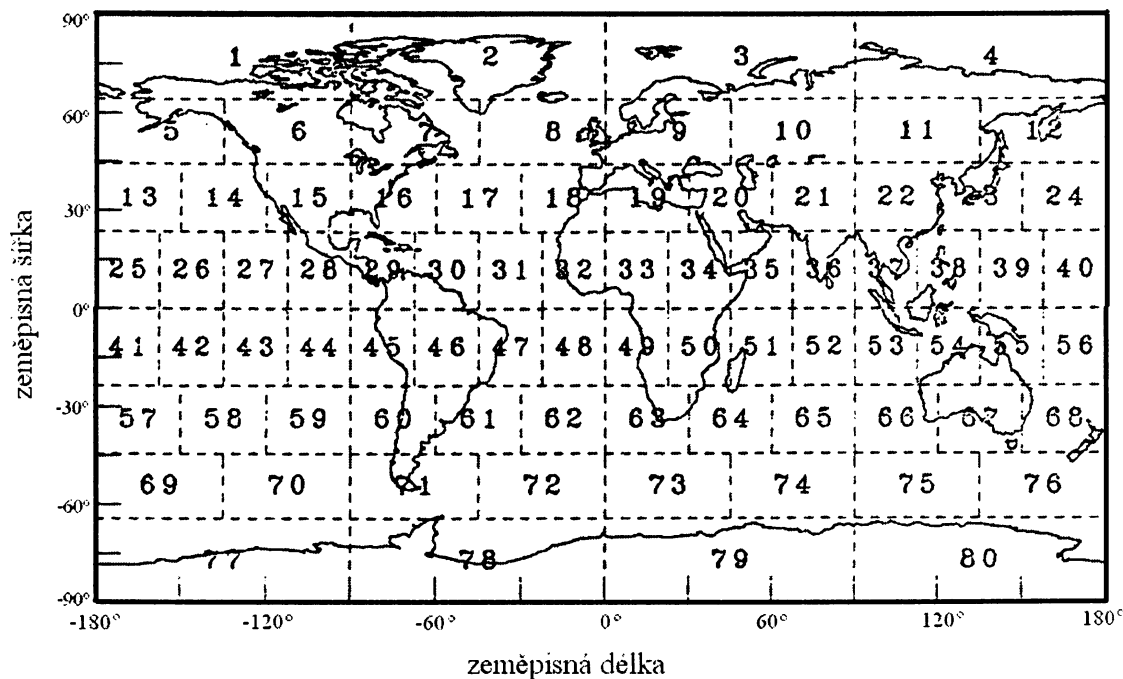
Obrázek 12. Roční hodnoty průměrné globální teploty vzduchu v letech 1850-2006, vztahené k období 1961-1990 (Střešník, 2007).



Obrázek 13. Průběh průměrné globální teploty vzduchu v letech 1850-2006 (modře) s aproximací parabolou (červeně) a data globální teploty vyhlazená 21-bodovým binomickým filtrem (černě) (Střešník, 2007).

Navíc se jedná i o průměr časový. Z naměřených hodnot se postupně vypočítá průměrná hodnota pro konkrétní den, měsíc, rok. Přitom se mezi jednotlivými stanicemi vyskytuje mnoho rozdílů v počtu a frekvenci měření, stejně jako v metodě počítání průměrů. Například meteorologická stanice v pražském Klementinu měří teplotu vzduchu každý den v 7:00, 14:00 a 21:00 hodin. Jelikož se v noci se teplota neměří, do výsledného denního průměru se započítává hodnota pro 21 hodin dvakrát (Wikipedia, 2009). Jiné stanice měří teplotu např. každou hodinu, dvakrát denně, atd. Z těchto rozdílně vypočítaných časových průměrů se poté vypočítá průměr prostorový, který je tím velmi zkreslený.

Prostorový průměr se počítá za pomoci tzv. "mřížové klimatologické sítě". První možností je rozdělit povrch Země na obdélníkové "elementy sítě" o stranách 5° zeměpisné šířky x 5° zeměpisné délky. Celkově je tedy těchto elementů sítě 2592 (36 x 72). Nevýhodou této sítě je rozdílná plocha jednotlivých elementů sítě. Proto se často používá jiná síť, která rozděluje povrch Země na 80 přibližně stejně velkých obdélníkových oblastí (obr. 14). Každá z nich je poté rozdělena mříží na dalších 100 stejně velkých obdélníků (Hansen, 1999).



Obrázek 14. Klimatologická síť, používaná mimo jiné k vypočtu průměrné globální teploty. Každý z 80 elementů sítě je dále rozdělen na 100 menších obdélníkových elementů sítě, které mají stejnou plochu (Hansen, 1999)

Získáváme tak 8000 stejně velkých elementů sítě, přičemž teplota každého z nich je určena jako průměr hodnot ze všech stanic, které se nacházejí na jeho území, s výjimkou stanic, které byly z různých důvodů vyloučeny z měření. Celková průměrná globální teplota Země je potom vypočítána jako průměr teplot všech 8000 elementů sítě (Hansen, 2001).

Zastánci deklarují, že takto získaná hodnota představuje měření roční globální teploty s přesností $\pm 0,05^\circ\text{C}$ (IPCC, 2000). Tento odhad přesnosti se zdá být velmi nadnesený vzhledem k tomu, jakým způsobem tato hodnota vzniká. Absolutní zhodnocení nejistot měření globální teploty je ve skutečnosti nemožné, jelikož použitá data obsahují mnoho neznámých chyb, které nejsou v tomto zhodnocení reflektovány (Brohan et al. 2005).

Chyby, které se promítají do výsledné hodnoty průměrné globální teploty, se dají rozdělit do tří hlavních skupin: chyby vznikající při měření na jednotlivých meteorologických stanicích, chyby způsobené tvorbou průměru z nedostatečného počtu (nerovnoměrně rozložených) stanic a chyby vzniklé při úpravě dat kvůli homogenitě (viz. kapitola 3.4.5.). Existuje nicméně celá řada dalších faktorů, způsobujících chyby, přičemž kvantifikace celkové chyby (nejistoty) průměrné globální teploty je téměř nemožná.

Brohnan et al. (2005) uvádí jako příklad výpočet chyby měsíční průměrné teploty z hodnot naměřených na meteorologické stanici. Náhodná chyba při jednom odečtení hodnoty z teploměru podle něj činí asi $0,2^\circ\text{C}$. Měsíční průměr je založen na alespoň dvou měřeních denně, což představuje asi 60 hodnot pro výpočet průměru. Chyba měsíční průměrné teploty je počítána jako $0,2 / 60^{0,5} = 0,026^\circ\text{C}$. Nyní si představme, že měříme teplotu každou minutu a z těchto hodnot poté počítáme měsíční průměr. Analogickým způsobem se tedy dostáváme k hodnotě chyby této průměrné teploty: $0,2 / 43200^{0,5} = 0,001^\circ\text{C}$, přičemž chyba jednotlivých odečtení teploty zůstává stále $0,2^\circ\text{C}$. Tato hodnota je zcela nereálná a naznačuje nedostatky takového výpočtu chyb. Kvantifikace chyby, která vzniká nerovnoměrným rozložením sítě

meteorologických stanic a její nedostatečnou hustotou, pak představuje nedostižný cíl, o který se můžeme snažit, ale výsledná hodnota bude vždy jen velmi hrubým odhadem.

3.2. Historie analýzy povrchové teploty Země

Výpočty průměrné globální teploty se opírají o současné i historické záznamy naměřených hodnot teploty vzduchu. Přístroje, které tuto teplotu poměrně spolehlivě měřily, byly vyvinuty v pozdním 17. století. D. G. Fahrenheit, který se proslavil výrobou přesných meteorologických přístrojů, vynalezl v roce 1714 rtuťový teploměr. Brzy poté jednotlivci i organizované skupiny začaly zakládat sítě meteorologických přístrojů ve snaze kvantifikovat a zaznamenávat počasí. Důvody byly zjevné: užitek v zemědělství, předpovědi počasí, atd. První snahy o monitorování ve velkém měřítku byly uskutečněny v západní Evropě. Časem se přístroje měřící teplotu rozšířily po celém světě a v současné době ve většině států funguje síť meteorologických stanic, které dokumentují počasí (Hansen, 2001).

Základní schéma analýzy povrchové teploty GISS (Goddard Institute for Space Studies, NASA), bylo definováno v pozdních 70. letech 20. století, když se objevila potřeba odhadnout změnu globální teploty pro srovnání s jednodimenzionálními modely globálního klimatu. Předchozí analýzy teplot pokrývaly pouze oblasti Země od 20 do 90° severní šířky. V té době byla představa taková, že množství měřících stanic na severní polokouli je dostatečné ke smysluplnému odhadu změny globální teploty, jelikož výkyvy a trend teplot dobře korelovaly i přes značné geografické vzdálenosti. Poprvé publikované výsledky analýzy GISS ukázaly, v rozporu s dřívějšími představami, že „globální ochlazení“ po roce 1940 bylo malé a zároveň statistika ukázala slabý dlouhodobý trend „oteplování“ celkově asi o 0,4 °C mezi 80. lety 19. století a 70. lety 20. století (Peterson et al. 1997).

Metoda analýzy byla zdokumentována Hansenem a Lebedeffem (1987) s poukázáním na to, že korelace teplotních změn je „rozumně“ velká pro stanice vzdálené od sebe do 1200km, zvláště pak ve středních zeměpisných šířkách. Také se pokusili učinit kvantitativní odhad chyb ve změnách průměrné roční a pětileté teploty. Tato hodnota se snažila postihnout chybu způsobenou nerovnoměrným prostorovým pokrytím Země měřícími stanicemi. Existuje však řada dalších zdrojů chyb, jako je třeba vliv městského tepelného ostrova u některých meteorologických stanic (Hansen, 2001).

Mnoho dalších metod bylo použito se snahou ověřit velikost globálního oteplování. Mezi tyto metody patřilo odvozování změny povrchové teploty z vertikálního teplotního profilu v zemi (hlubinné vrty) na mnoha lokalitách rozmístěných po světě, míra ústupu ledovců též na mnoha lokalitách a studie týkající se vlivu městských tepelných ostrovů a jiných činností člověka na záznam globální teploty. Je zřejmé, že by pozornost měla být upřena k místům vzdáleným od jakýchkoli lokálních lidských aktivit (Hansen, 1999).

Určitý pokrok znamenalo použití satelitního pozorování nočních světél, které označilo stanice v USA, lokalizované v urbánních nebo částečně urbánních oblastech. Dlouhodobé trendy u těchto stanic pak byly upraveny v souladu s trendy blízkých stanic v rurálním prostředí (Hansen, 1999).

3.3. Současná metoda analýzy

Současná analýza globální povrchové teploty používá data z následujících sad: neupravená data Globální historické klimatologické sítě (Global Historical Climatology Network), data historické klimatologické sítě Spojených Států (United States Historical Climatology Network) a data SCAR (Scientific Committee on Antarctic Research) z antarktických stanic (Peterson et al. 1997).

Grafy a tabulky jsou aktualizovány pravidelně kolem desátého dne v měsíci za požití nových dat z klimatologických sítí. Data jsou upravována ve dvou krocích. Zaprvé pokud je více záznamů z určité oblasti, jsou tyto zkombinovány do jediného záznamu. Ve druhém kroku jsou data ze stanic v urbánním prostředí upravena tak, aby se jejich dlouhodobé trendy shodovaly s průměrem blízkých rurálních stanic. Urbánní stanice bez blízkých rurálních stanic jsou vypuštěny (Peterson et al. 1997).

Index globální teploty (global temperature index) kombinuje měření z meteorologických stanic s teplotami mořského povrchu, které jsou získány z historických záznamů měření na obchodních lodích, v současnosti je pak zdrojem dat satelitní měření.

Analýza je omezena na období od roku 1880 z důvodu chudého prostorového pokrytí a klesající kvality dat před tímto obdobím (Hansen, 1999).

3.4. Data z historických meteorologických pozorování

Dnešní výzkum klimatu se opírá především o údaje naměřené pomocí přístrojů na měřicích stanicích. Je tomu tak jednoduše proto, že lepší data nejsou k dispozici. Zatímco ostatní indikátory (např. letokruhy stromů) taktéž zaznamenávají výkyvy klimatu, jsou obecně více deduktivní než přímé měření meteorologických podmínek a navíc jsou v současnosti dostupné na daleko méně lokalitách než data naměřená přístroji. Je to tedy "instrumentální síť", která představuje územně a časově nejkompletnější záznam klimatu na povrchu pevnin od začátku průmyslové revoluce (Hansen, 1999).

Jelikož většina meteorologických sítí byla založena za účelem monitorování lokálního počasí a ne dlouhodobého klimatu, jsou zde určité praktické problémy s použitím těchto dat ke studiu změny klimatu. Záznamy například často nejsou digitalizovány, nebo nejsou snadno

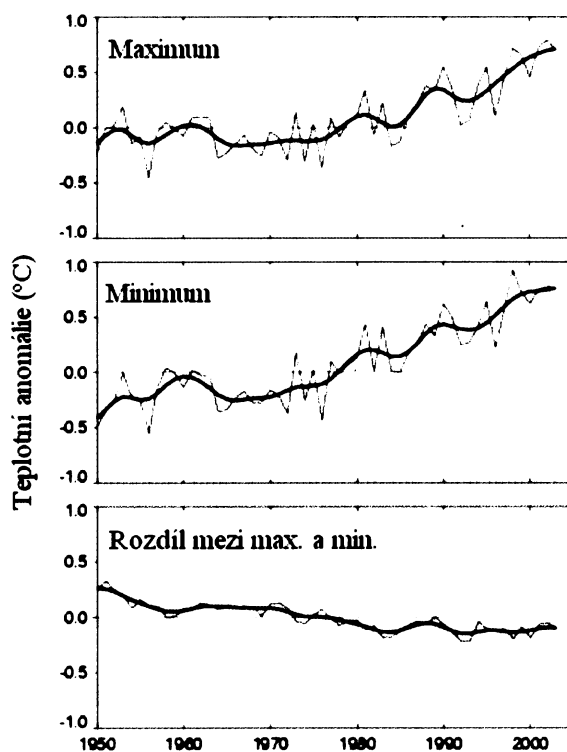
dostupné za hranicemi státu, ve kterém měření probíhá. Nerovnoměrné rozložení měřících stanic oprávněně vzbuzuje pochybnosti o vypovídací schopnosti odhadnutých teplotních trendů. Historické záznamy teplot také často obsahují chybná data, vzniklá při záznamu či archivování. Tyto chyby samozřejmě také snižují jistotu analýzy. Záznamy navíc nejsou "homogenní" z důvodů jako je např. přemístování lokálních měřících stanic, či nahrazení starých teploměrů novými. Dohromady tyto faktory značně snižují důvěryhodnost závěrů, které jsou vyvozeny z historických záznamů povrchových teplot (Peterson et al. 1997).

V mnoha pokusech o vytvoření databáze dat o dlouhodobém globálním klimatu se jejich tvůrci snažili vypořádat s těmito problémy, třebaže vycházeli taktéž hlavně z nasbíraných historických dat. Jeden z prvních a nejdéle běžících projektů je iniciativa World Weather Records (WWR), které vznikla v roce 1923 a vedla k pravidelné publikaci desetiletých sérií záznamů teplot z různých částí světa. Další příklad je soubor dat ústavu National Center for Atmospheric Research (USA), který je složen z výsledků iniciativy WWR a záznamů z pozdějšího období, naměřených v National Climatic Data Center (NCDC). Tyto databáze jsou jistě užitečné, avšak nezahrnují některá nově dostupná data (například z americko-ruských bilaterálních výměn dat). Navíc žádná databáze neobsahuje detailní výzkum kvality dat, což limituje jejich použití pro studium klimatické změny (Peterson et al. 1997).

Začátkem 90. let 20. století klimatologové z NCDC a CDIAC (Carbon Dioxide Information Analysis Center) podnikli novou iniciativu zaměřenou na vytvoření databáze použitelné pro studium klimatických změn na globální i lokální úrovni. Tato databáze, která staví na práci jejích předchůdců, je známá jako Global Historical Climatology Network (GHCN) a byla představena v roce 1992. Obsahuje měsíční průměry teplot z 6039 pozemních meteorologických stanic. V porovnání s většinou ostatních databází tohoto typu měla síť GHCN relativně hustší a detailněji propracované prostorové pokrytí povrchu Země. Od doby

jejího vydání byly tisíce kopií poskytnuty výzkumníkům i studentům z celého světa a stala se také oblíbeným nástrojem ve výzkumu globální změny klimatu. Po úspěchu GHCN připravili vědci z NCDC, CDIAC a Arizonské Státní Univerzity obohacenou této databáze, aby uspokojili stoupající zájem o tato data. Vylepšená databáze (GHCN verze 2) přinesla některé nové prvky do oblasti klimatického výzkumu. Vylepšení se skládá z několika bodů: za prvé byla zařazena data z dalších stanic, aby se zlepšilo prostorové pokrytí, zvláště pak v oblastech, kde bylo předtím nedostatečné. Za druhé byla přidána data o měsíčních teplotních maximech a minimech jakožto důležité informace, které nelze získat ze samotného průměru teplot. Tím je myšleno hlavně sledování trendu teplotních maxim a minim a rozpětí mezi nimi (obr. 15).

Za třetí byla zhodnocena kvalita dat, aby se co možná nejvíce snížila nejistota výsledků výzkumů. Čtvrtý bod spočíval v pečlivém a objektivním zhodnocení homogenity dat (viz. kapitola 3.4.5.) ve snaze snížit vliv neklimatických faktorů na soubory dat. Za páté se začala vést podrobná metadata (např. údaje o populaci, vegetaci, topografii; viz. kapitola 3.4.6.), která umožňují podrobnější analýzu. A konečně za šesté byl vytvořen systém pro aktualizaci databáze v řádných intervalech, takže současné klimatické podmínky mohou být neustále vkládány do historické perspektivy (Hansen, 1999).



Obrázek 15. Trend teplotních maxim a minim a rozdíl mezi nimi v období let 1950-2004 (Vose et al. 2004)

3.4.1. Zdroje dat

Jedním ze základních cílů druhé verze databáze GHCN bylo zahrnutí dalších dat a tím obohacení prostorového i časového pokrytí. Tato snaha má tři hlavní důvody: za prvé data z aktuálních měsíců umožňují zhodnotit současné klimatické podmínky a zařadit je do historického kontextu, za druhé hustší pokrytí je žádoucí pro analýzu regionálních klimatických změn a za třetí je potřeba dosáhnout lepšího pokrytí v mnohých oblastech světa. Situace je taková, že mnoho různých institucí má své meteorologické stanice, ale neexistuje jednotný archiv pro data ze všech. K získání co největšího objemu dat se využívají různé strategie, jako je kontaktování datových center, vytváření osobních kontaktů, hledání v literatuře, nebo psaní různých žádostí. Obecně se dá říct, že většina společností byla ochotná k poskytnutí svých dat pro iniciativu GHCN, zvláště od té doby, co je GHCN základní databází Světové Meteorologické Organizace (WMO). Výsledek je takový, že databáze GHCN verze 2 obsahuje soubory dat z 31 různých zdrojů (tabulka 4), které dále obsahují teplotní data z různého počtu stanic od jedné až po několik tisíc (Peterson et al. 1997).

Sběr dat začal kontaktováním institutů, které sbírají, archivují, spravují a distribuují meteorologická data. Tímto způsobem bylo získáno asi 12 souborů dat z celkových 31. Tvůrci také zapojili svoje známé a požádali je, aby hledali potenciální zdroje dat. Například vědci, kteří navštěvují nebo pracují ve spojení s institutem příslušným autorovi, mají často sami tato data, nebo mohou být nápomocni k získání těchto dat od jiných společností. Tato metoda byla také velmi úspěšná a znamenala dalších 10 souborů dat.

Tabulka 4. Zdroje, jejichž data byla zařazena do GHCN verze 2 a počet stanic, které poskytly teplotní data u každého z nich, přičemž je dále rozlišeno, kolik stanic poskytuje měsíční průměry teplot a kolik měsíční maxima a minima teplot (Peterson et al. 1997).

Jméno souboru teplotních dat či instituce, která data poskytla.	Počet meteorologických stanic pro	
	Průměr teplot	Max-Min
National Center for Atmospheric Research's world monthly surface station climatology	3563	0
National Climatic Data Center's maximum–minimum temperature dataset	3179	3179
Deutscher Wetterdienst's global monthly surface summaries dataset	2559	0
Monthly climatic data for the world	2176	0
Climate Prediction Center's CAMS dataset	2124	0
World Weather Records (1971–80)	1912	0
World Weather Records (1961–70)	1858	0
U.S. Summary of the Day Dataset	1463	1463
U.S. Historical Climatology Network	1221	1221
A climatological database for Northern Hemisphere land areas	920	0
Australian National Climate Center's dataset for Australia and surrounding countries	785	785
North American climate data, NCDC	764	764
Bo-Min's dataset for the People's Republic of China	378	0
USSR network of CLIMAT stations	243	0
Daily temperature and precipitation data for 223 USSR stations (NDP-040)	223	223
Two long-term databases for the People's Republic of China (NDP-039)	205	60
ASEAN climatic atlas	162	162
Pakistan's meteorological and climatological dataset	132	132
Diaz's dataset for high-elevation areas	100	0
Douglas' dataset for Mexico	92	0
Ku-nil's dataset for Korea	71	71
Jacka's dataset for Antarctic locales	70	0
Monthly data for the Pacific Ocean–western Americas	60	0
U.S. Historical Climatology Network (Alaska)	47	47
Muthurajah's dataset for Malaysia	18	18
Hardjwinata's dataset for Indonesia	13	13
Fitzgerald's dataset for Ireland	11	11
Sala's dataset for Spain	3	0
Al-kubaisi's dataset for Qatar	1	1
Al-sane's dataset for Kuwait	1	1
Stekl's dataset for Ireland	1	1

Někdy je možné získat data pomocí spřízněných projektů. Například NCDC v nedávné době shromáždila a zpracovala data pro období 1961 – 1990 jako příspěvek WMO. Při této příležitosti členské země WMO dodaly detailní data v ročních a měsíčních periodách a jiné statistiky. Při přijímání těchto dat byly členské země kontaktovány ohledně příspěví dat do GHCN. Podobným způsobem bylo získáno několik souborů dat (Peterson et al. 1997).

Pokud byl vhodný typ teplotních záznamů nalezen v odborných člancích či publikacích, jejich autor byl kontaktován a požádán o poskytnutí těchto dat. Tento způsob hledání nebyl obecně tak výnosný jednoduše proto, že většina dat z publikací byla již použita dříve. Hledáním na internetu bylo objeveno mnoho verzí již použitých souborů dat, ale jen málo dosud nepoužitých. Jak se ukazuje, mnoho vědců shání teplotní data, ale pouze málo z nich se věnuje jejich skutečnému získávání či digitalizaci historických dat (Peterson et al. 1997).

Představu, jak vypadá zdroj teplotních dat GHCN, si můžeme udělat z tabulky 5. Ta představuje ukázkou z databáze "Monthly climatic data for the world". Data v tabulce 5 se vztahují k měsíci dubnu 1995. Jak je vidět, Českou Republiku zde zastupuje pět lokalit: Cheb, Praha/Ruzyně, Praha – Libuš, Brno/Tuřany a Ostrava/Mošnov. Jedná se tedy o lokality letišť, které nejsou příliš vhodné k analýze klimatu z důvodu přítomnosti tzv. tepelného ostrova. Teplota je zde vyšší následkem antropogenních činností, hlavně pak produkcí odpadního tepla a změn aktivního povrchu (betonové plochy).

Tabulka 5. Ukázka průměrů teplot pro vybrané oblasti a duben 1995 z databáze "Monthly climatic data for the world", která je jedním ze zdrojů GHCN. Kromě průměrné teploty obsahuje databáze i metadata (viz. kapitola 3.4.6.) v podobě zeměpisné šířky a délky a nadmořské výšky (NOAA, 2009).

Stanice	zeměpisná šířka	zeměpisná délka	nadmořská výška	průměrná teplota
	(° ')	(° ')	(m)	(°C)
GERMANY				
10035 SCHLESWIG	5432N	00933E	48	6.8
10147 HAMBURG-FUHLSDUETTEL	5338N	01000E	16	8.3
10170 ROSTOCK-WARNEMUENDE	5411N	01205E	10	7.4
10338 HANNOVER	5228N	00941E	59	8.7
10379 POTSDAM	5223N	01304E	99	8.8
10410 ESSEN	5124N	00658E	161	9.4
10438 KASSEL	5118N	00927E	233	9.3
10499 GOERLITZ	5110N	01457E	238	8.2
10578 FICHELBERG	5026N	01257E	1215	2.3
10628 GEISENHEIM	4959N	00757E	120	10.9
10763 NUERNBERG	4930N	01105E	312	10.3
10870 MUENCHEN, FLUGHAFEN	4822N	01148E	447	9.1
10929 KONSTANZ	4741N	00911E	447	9.6
10961 ZUGSPITZE	4725N	01059E	2962	-7.1
AUSTRIA				
11028 ST. POELTEN	4812N	01537E	282	10.1
11035 WIEN/HOHE WART	4815N	01622E	209	10.8
11120 INNSBRUCK-FLUGHAFEN	4716N	01121E	593	8.6
11146 SONNBLICK	4703N	01257E	3109	-7.7
11150 SALZBURG-FLUGHAFEN	4748N	01300E	450	10.1
11155 FEUERKOGEL	4749N	01344E	1621	1.5
11212 VILLACHERALPE	4636N	01340E	2160	-1.0
11231 KLAGENFURT-FLUGHAFEN	4639N	01420E	476	9.6
11240 GRAZ-THALERHOF- FLUGHAFEN	4700N	01526E	347	10.4
CZECHOSLOVAKIA				
11406 CHEB	5005N	01224E	471	8.1
11518 PRAHA/RUZYNE	5006N	01415E	369	8.3
11520 PRAHA-LIBUS	5001N	01427E	304	9.3
11723 BRNO/TURANY	4909N	01642E	246	9.5
11782 OSTRAVA/MOSNOV	4941N	01807E	256	8.4
11903 SLIAC	4838N	01909E	318	8.7
11934 POPRAD/TATRY	4904N	02015E	707	6.1
POLAND				
12120 LEBA	5445N	01732E	2	5.9
12160 ELBLAG	5410N	01926E	13	7.9
12205 SZCZECIN	5324N	01437E	3	8.2
12295 BIALYSTOK	5306N	02310E	151	7.2
12330 POZNAN	5225N	01650E	92	8.5
12375 WARSZAWA-OKECIE	5210N	02058E	107	7.8
12424 WROCLAW II	5106N	01653E	121	8.8
12497 WLODAWA	5133N	02332E	179	7.9

3.4.2. Eliminace duplicit

Soubor teplotních dat pro danou oblast je často možné získat z více než jednoho zdroje. Například data pro oblast Tombouctou (Mali) jsou dostupné v šesti různých zdrojových souborech dat. Pokud se "spojují" data z více zdrojů, je důležité rozpoznat tyto duplicitní časové série, jelikož zahrnutí více verzí dat ze stejné stanice zkresluje výslednou hodnotu průměrné globální teploty. Cílem eliminace duplicit je redukce početného souboru n teplotních dat, z nichž mnoho je identických, na mnohem menší soubor m teplotních dat, které jsou jedinečné. V případě maximálních a minimálních teplot bylo 8000 souborů dat zredukováno na 4964. Za prvé byla data z každé stanice porovnána s daty z jiných stanic. Přirozeně se začalo se stanicemi, jejichž metadata (viz. kapitola 3.4.6.) napovídala tomu, že mohou být ze stejné lokality. Stejnost souborů dat byla určena vyčíslením celkového počtu měsíců identických dat a také procentuálním vyjádřením. Soubory měsíčních teplotních maxim a minim byly považovány za duplikáty, pokud sdílely stejné hodnoty nejméně z 90%, přičemž alespoň 12 měsíců muselo být identických a ne více než 12 měsíců mohlo být rozdílných. Tento proces odhalil mnoho duplikátů, které poté byly sloučeny (Peterson et al. 1997).

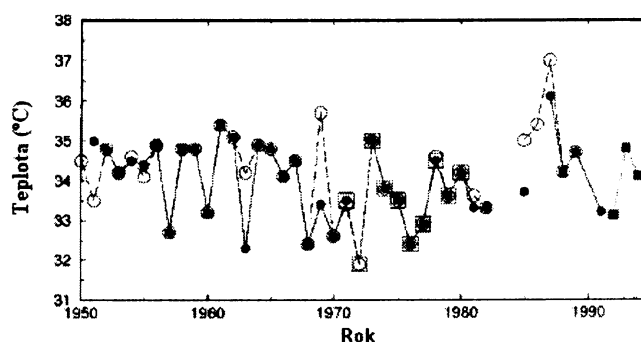
Případy, kdy byly soubory dat určeny jako duplikáty ze stejné stanice, ale metadata naznačovala tomu, že to tak není, byly pečlivě vyšetřeny a poté bylo učiněno subjektivní rozhodnutí. Například v teplotních datech pro Thamud (Jemen) se nalézají perioda 25 let (1956-1981) měsíčních hodnot, které jsou přesně stejné jako teplotní data z Kuvajtského mezinárodního letiště (o 12° s. š. výše). Není třeba říkat, že jeden datový soubor je chybný. Stejně jako v ostatních případech tohoto typu bylo rozhodnutí, která data jsou chybná, otázkou zkoumání dat včetně metadat a uplatnily se znalosti jednotlivých datových souborů, nicméně konečné rozhodnutí nemusí být vždy správné (Hansen, 1999).

Proces eliminace duplicit u měsíčních průměrů teplot byl náročnější než u teplotních maxim a minim. Prvních 10000 duplikátů (z více než 30000 původních datových souborů) bylo identifikováno stejnou metodou jako u předchozího případu. Naneštěstí měsíční průměry teplot byly počítány minimálně 101 různými způsoby (Peterson et al. 1997), proto nelze použít digitální porovnávání k identifikování zbývajících duplicit. Ve skutečnosti rozdíly, způsobené odlišnými metodami počítání průměru, mohou být větší než skutečné rozdíly teplot u dvou sousedních stanic. Bylo proto nutné intenzivně zkoumat související metadata. Pravděpodobné duplicity byly připsány jedné stanici, ale na rozdíl od případu maximálních a minimálních teplot, nebyly sloučeny, jelikož skutečná data nebyla přesně stejná, pouze podobná. Ve výsledku GHCN verze 2 obsahuje více verzí měsíčních průměrů teplot pro mnoho stanic. Obrázek 16 ukazuje situaci v případě oblasti Tombouctou (Mali), kde bylo šest původních souborů dat sloučeno za vzniku čtyř různých, ale podobných souborů dat pro stejnou stanici (Peterson et al. 1997).

Zachování několika duplikátů je matoucí, může být i "výhodné".

Odpadají chyby spojené se slučováním duplikátů. Připojování současných dat ke starším způsobuje chyby, pokud nebyl průměr teplot vypočítán stejnou metodou pro oba soubory dat. Pokud

jsou k dispozici dvě různé hodnoty pro stejnou stanici a čas, často není možné rozhodnout, která z nich je správná. Ve skutečnosti mohou být obě správné a liší se pouze v důsledku rozdílných metod výpočtu průměru. Zachování duplikátů nicméně způsobuje obtíže

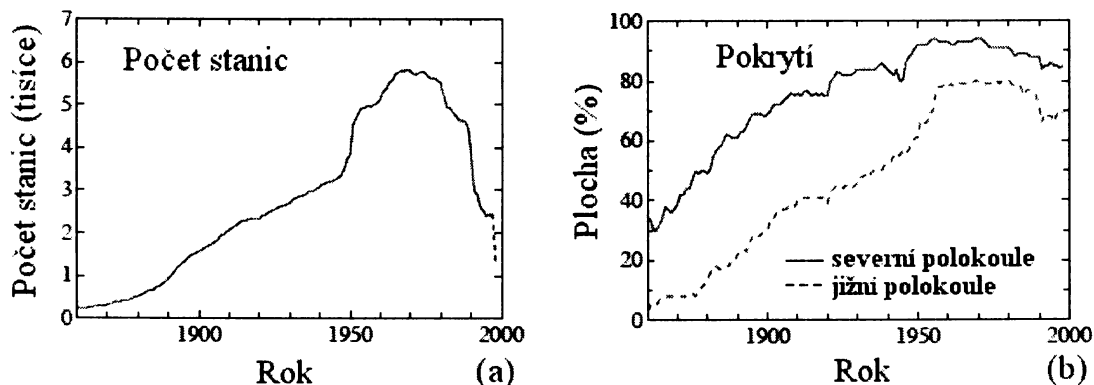


Obrázek 16. Tombouctou (Mali), průměrné teploty pro měsíc květen od roku 1950 do 1995. Data průměrů teplot pro Tombouctou se vyskytují v šesti z 31 zdrojových datasetů. Z těchto šesti časových sérií je možné některé zkombinovat ze vzniku čtyř různých teplotních časových sérií (duplikátů). V grafu je každý duplikát označen jiným symbolem. V mnohých bodech se duplikáty shodují, nicméně rozdíly jsou tak velké, že tyto série nemohly být zkombinovány (Peterson et al. 1997).

uživatelům, kteří jsou zvyklí na jednu "správnou" hodnotu průměru pro každou stanici. Existuje mnoho způsobů, jak využít duplicitní data, všechny však mají své nevýhody. Lze například použít ten z duplikátů, který obsahuje nejvíce dat pro období zájmu. Také je možné použít duplikát s nejdelsí periodou záznamu a v chybějících bodech ji doplnit daty z ostatních duplikátů. Další možností je zprůměrování dat ze všech duplikátů a vytvoření průměrných teplotních dat. Tento proces zkresluje výslednou hodnotu průměrné globální teploty, jelikož vychází z duplicitních dat (Peterson et al. 1997).

3.4.3. Distribuce stanic

GHCN verze 2 obsahuje data měsíčních průměrů teplot ze sítě 7280 stanic a pro měsíční maxima a minima teplot ze 4964 stanic. Jedná se vždy o data za alespoň 10 let. Obrázek 17. ukazuje změny v počtu stanic (a) od roku 1850 do 1997 a změny v globálním pokrytí stanicemi (b), definované jako procento plochy, která se nachází v oblasti do 1200 km od některé ze stanic. Graf začíná rokem 1850, ale nejstarší záznam průměru teplot je pro leden 1701 v Berlíně a nejstarší záznam maxim a minim teplot v GHCN je pro březen 1840 v Torontu. Důvody, proč počty stanic v GHCN v posledních desetiletích klesají, spočívají v tom, že zdrojové soubory dat jsou často retroaktivní kompilace (např. World Weather Records) a mnoho jiných zdrojů dat bylo vytvořeno či získáno před lety. Pro současná data jsou k dispozici pouze tři zdroje dat (Hansen, 1999).

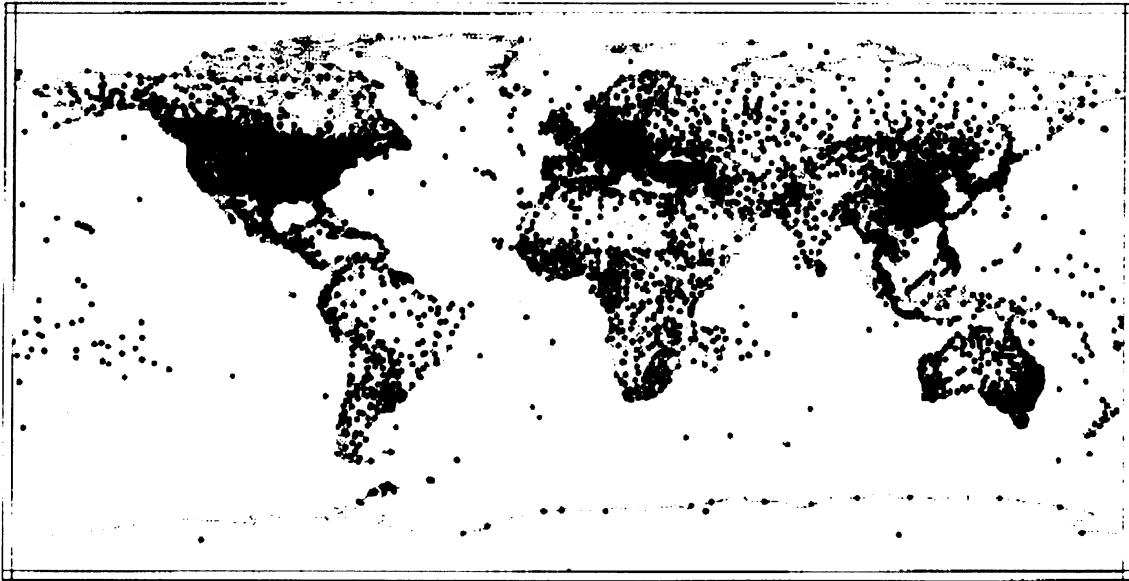


Obrázek 17. Vývoj počtu stanic (a) a pokrytí povrchu Země (b) v čase. Graf začíná v roce 1850, ale nejstarší záznam průměrné teploty pochází z ledna 1701 z Berlína a první data maximálních a minimálních teplot jsou z března 1840 v Torontu. Důvody, proč počty stanic v GHCN v posledních desetiletích klesají, spočívají v tom, že zdrojové soubory dat jsou často retroaktivní kompilace (např. World Weather Records) a mnoho jiných zdrojů dat bylo vytvořeno či získáno před lety. Pro současná data jsou k dispozici pouze tři zdroje dat (Hansen, 1999).

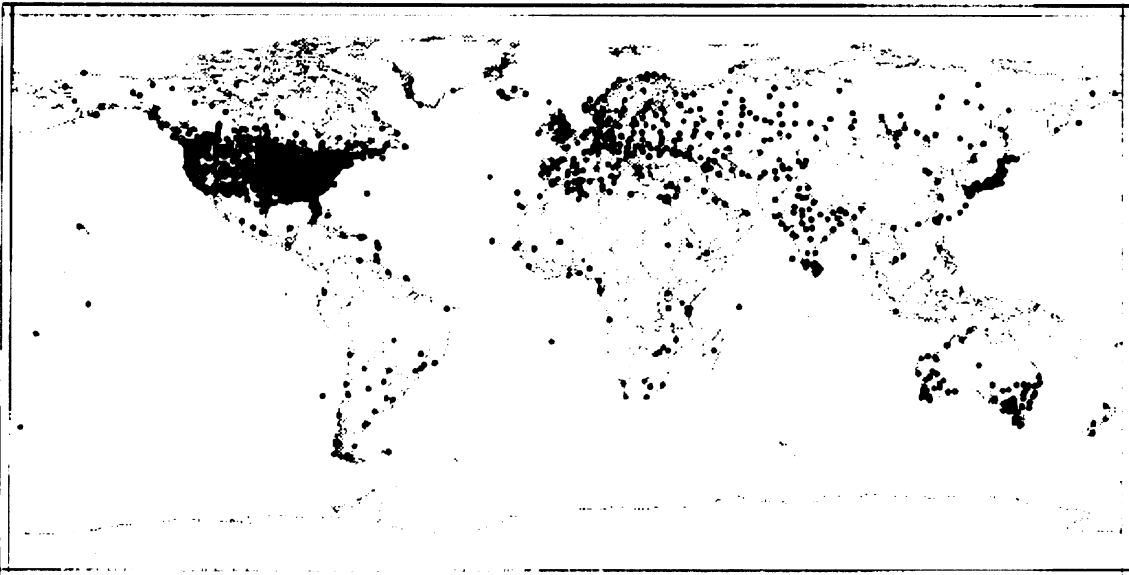
Rozložení stanic, měřících teplotu je samozřejmě velmi nerovnoměrné. Jak ukazuje obrázek 18a, pokrytí Severní Ameriky, Evropy a ostatních osídlených oblastí je poměrně husté, ale ještě větší plocha neobydlených oblastí je pokryta velmi řídko. Navíc se periody jednotlivých záznamů teplot značně liší. Například data z některých stanic byla digitalizována ve speciálních projektech v 70. letech 20. století a data z pozdějšího období již nejsou k dispozici. Pokud se podíváme na pokrytí v roce 1900 (obr. 18b), vidíme poměrně hustou síť stanic v Severní Americe, Evropě a částech Asie a Austrálie. Pro zbytek světa jsou data z období před rokem 1900 vzácná. Nicméně přesto je z těchto údajů možno vypočítat globální teplotu za sto nebo i více let, spolehlivost takového údaje je však značně nejistá. Přesto databáze GHCN představuje nejlepší dostupný nástroj pro studium dlouhodobého vývoje klimatu, jelikož má lepší pokrytí než ostatní klimatické databáze. Jeden z projektů sběru dat "The Colonial Era Archive Project" pokračuje v digitalizaci ranných dat z celého světa, což zlepšuje pokrytí z období před rokem 1900, nicméně i tak je pokrytí stále limitujícím

faktorem snahy o zachycení trendu globálního klimatu. Síť stanic, u nichž by měla být ověřena homogenita dat (viz kapitola 3.4.5.), je ještě řidší (5206 stanic pro měsíční průměry teplot a 3647 stanic pro maxima/minima). Tato síť obsahuje méně stanic, jelikož zde byl požadavek alespoň 20 let záznamu a taktéž data z některých izolovaných stanic byly vyloučeny. Síť stanic, které poskytují měsíční hodnoty maximálních a minimálních teplot, je ještě řidší (obrázek 19.). Pokrytí je tak malé proto, že soubory dat z těchto stanic mají velmi proměnlivou periodu záznamu. Například značná část teplotních maxim/minim v Africe pochází z iniciativy "the Colonial Era Archive project", kde byla digitalizována data z období zhruba před rokem 1960. Důvodem nedostatku těchto dat je i fakt, že si je až donedávna jen málo zemí pravidelně vyměňovalo. Zatímco organizace jako WMO či NCDC považují mezinárodní výměnu těchto dat za prioritu, potrvá ještě nějaký čas, než se historická mapa s těmito údaji trochu více zaplní. Dnes, jakkoli je zde prezentována největší databáze ze všech dostupných, je pokrytí údajů o maximech a minimech teplot z období kolem roku 1900 velmi chudé (Peterson et al. 1997).

(a)



(b)

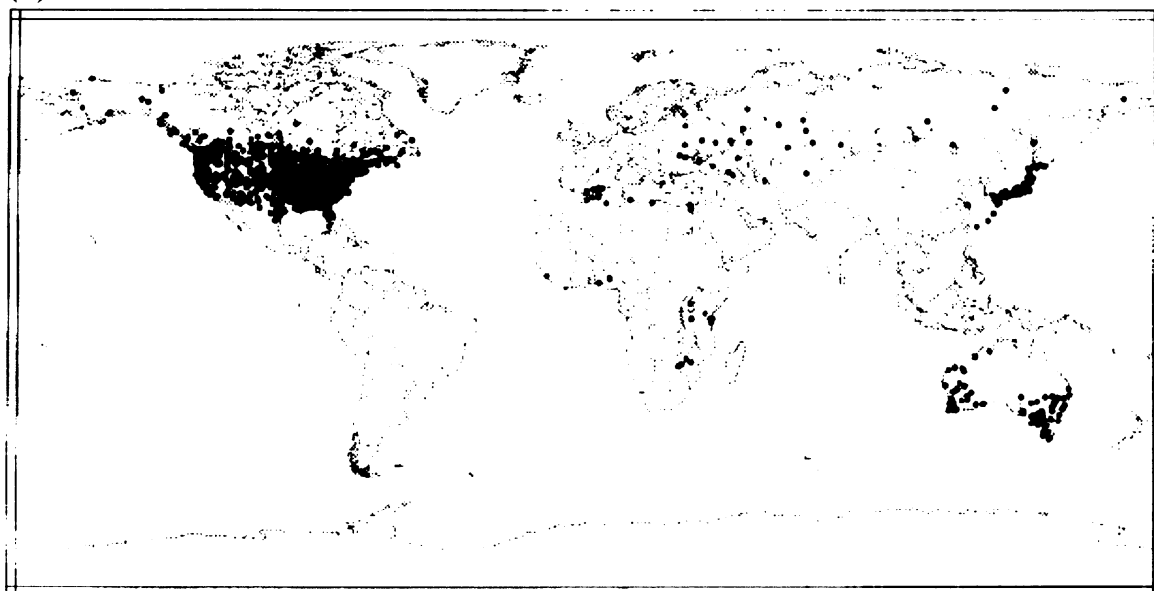


Obrázek 18. Mapy stanic, které pro GHCN poskytly měsíční průměry teplot: (a) všechny stanice měřící průměr, (b) stanice v roce 1900 (Peterson et al. 1997).

(a)



(b)



Obrázek 19. Mapy stanic, které pro GHCN poskytly měsíční maxima a minima teplot: (a) všechny stanice v GHCN, (b) stanice v roce 1900 (Peterson et al. 1997).

3.4.4. Kvalita dat

Kontrola kvality dat sítě GHCN je třístupňový proces. V prvním stupni je zkoumána kvalita a vhodnost zdrojů (souborů dat z jedné až několika tisíc meteorologických stanic, které byly shromážděny různými institucemi). Data ze 31 zdrojů byla zakomponována do GHCN, zatímco několik ostatních potenciálních zdrojů (a tím i data z tisíců dalších stanic) muselo být odmítnuto. Zamítnuty byly soubory dat upravené kvůli homogenitě, bez přístupu k původním datům, dále data získaná ze synoptických reportů, která jsou téměř vždycky nekompletní a způsobila by tak neakceptovatelné chyby. Také byly odmítnuty soubory dat, ve kterých se vyskytovaly specifické procesní chyby, které byly jasnou indikací, že je soubor nepoužitelný (Hansen, 1999).

Další stupeň kontroly kvality dat spočíval v kontrole souborů dat z jednotlivých měřicích stanic. Tyto testy zahrnovaly porovnávání stanic s mřížovou klimatologickou sítí a upřesňování polohy stanic. Oba tyto procesy odhalily nevhodně umístěné stanice. Navíc byly u každého souboru dat hledány specifické diskontinuity pomocí počítačových testů kumulativního součtu (Peterson et al. 1997).

Třetí a poslední stupeň kontroly kvality dat GHCN je zaměřen na jednotlivá data a hodnotil, zda jsou příliš odlehlá v čase a prostoru. Všechny hodnoty průměrů teplot, které se lišily od průměru alespoň než 2,5krát více než je směrodatná odchylka, byly označeny. Všechny takto označené hodnoty byly poté porovnány s hodnotami ze sousedních stanic a tímto způsobem se usuzovalo, zda extrémní hodnota reprezentuje extrémní klimatickou událost v regionu. Jako "pravdivých" se později ukázalo být asi 85% takto označených dat. Ta z dat, která neuspěla ve všech testech pak byla vyřazena z hlavního archivu GHCN, ale zachována odděleně pro možné použití v budoucnu (Peterson et al. 1997).

3.4.5. Homogenita

Většina meteorologických stanic prošla během své existence změnami, což činí data z těchto stanic nehomogenní, ve smyslu že nebyla měřena za stejných podmínek. Těchto změn, které způsobují diskontinuity (nespojivosti) je mnoho: změny přístrojů, změny krytu, okolního prostředí, lokality stanice, času měření, metody výpočtu průměru a další. Navíc se často vyskytuje několik těchto změn zároveň, často v souvislosti s přechodem na automatické meteorologické stanice, které jsou dnes běžné na mnoha místech světa. Tyto skutečnosti jsou další velkou překážkou pro analýzu globální klimatické změny a je třeba učinit alespoň nějaká opatření na zlepšení stavu. Teplotní data GHCN obsahují dva odlišné soubory dat: originální data a data upravená kvůli homogenitě. Samotný proces úpravy probíhal ve dvou krocích (Hansen, 1999).

První krok spočíval ve vytvoření homogenního referenčního souboru dat pro každou stanici. Vytvoření kompletně homogenních referenčních souborů z dat, ve kterých se vyskytují neznámé inhomogenity je nemožné, ovšem je zde alespoň snaha o co největší homogenitu za daných možností. Pozornost byla upřena na sousední stanice, jejichž hodnoty by co nejvíce korelovaly s těmi z cílové stanice. Analýza jejich dat pak probíhala na upravených souborech dat tzv. "prvního rozdílu" (first difference): $FD_1 = (T_2 - T_1)$. Změny teploměřů by pak měly poznamenat jen 1 rok záznamu, zatímco u originálních záznamů ovlivní všechny následující roky (Hansen, 1999).

Druhá technika, která byla použita za účelem zmenšení vlivu diskontinuit na data, spočívala ve vytvoření referenčních souborů dat ve formě FD (first difference), do kterých se nezahrnou data cílového roku. Pokud se zdálo, že první rozdíl tohoto roku nadměrně způsobuje diskontinuity, byl tento rok vyškrtnut. Při tvorbě referenčních FD souborů pro

každý z testovaných roků byla použita nejlépe korelující data z pěti sousedních stanic, které měly dostatek dat pro tento model (Hansen, 1999).

Poslední technika používá průměr tří středních hodnot (z hodnot pěti sousedních stanic) a z tohoto průměru utvoří FD referenčních souborů dat. Přitom se předpokládá, že pokud se vyskytuje specifická diskontinuita u dat z jedné stanice z pěti, tato stanice bude mít nevyšší nebo naopak nejmenší hodnoty. Poslední bod spočíval v převodu referenčních souborů dat z formy FD do klasických hodnot a srovnání tak, že hodnota posledního roku referenční série se rovná hodnotě původní série (Hansen, 1999).

Když byly referenční soubory dat hotové, začalo hledání nehomogenit zkoumáním rozdílů mezi původním a referenčním souborem. Při tom se předpokládalo, že referenční soubory přesně odrážejí klima v regionu, takže každá významnější změna či odchylka přímo souvisí s diskontinuitami v datech stanice. Při hledání konkrétních bodů začátku a konce diskontinuity se použila lineární regrese na část série před testovaným rokem a následně na část po tomto roku. Tento postup se aplikoval na všechny roky zahrnuté do souboru dat a rok s nejmenším zbytkovým součtem čtverců byl považován za rok s potenciální diskontinuitou. Takto získané potenciální diskontinuity jsou pak dále testovány např. metodou Multiresponse Permutation Procedure (MRPP) (Hansen, 1999).

Cílem je nastavení historických dat tak, aby byla homogenní se současnými pozorováními a nová data se mohla doplňovat přímo do upraveného datového souboru. Protože hlavním cílem této úpravy dat je jejich použití k analýze dlouhodobého klimatu, byly upravovány pouze ty soubory, které obsahovaly data za alespoň 20 let. Také nebylo možno upravit data ze všech stanic. Data z osamělých stanic, u kterých nelze vytvořit adekvátní referenční soubor (korelace mezi původní a referenční sérií musí být alespoň 0,80), nemohla být upravena. Verze GHCN s ověřenou homogenitou zahrnuje pouze data ze stanic, které jsou považovány za homogenní a z těch, u kterých je možné je data vhodně upravit a učinit je tak

homogenními. Tento oddíl je proto méně obsáhlý než originální verze dat a nejstarší data v něm pocházejí z roku 1850 (Hansen, 1999).

U 1221 stanic v USA byla homogenita zajišťována poněkud jiným způsobem. Data byla přímo převzata ze sítě U.S. Historical Climatology Network, což je sesterský projekt GHCN. Tato data byla upravena kvůli homogenitě už při vzniku U.S. HCN, za použití informací z metadat a takto upravené soubory dat byly přímo zakomponovány do GHCN. Pro klimatické analýzy, týkající se pouze oblasti USA, jsou preferována data U.S. HCN, jelikož jeho stanice jsou poměrně dobře distribuované, většinou rurálního charakteru a byly vybírány na základě jejich polohy a podle jejich historických metadat, která indikovala, že se jedná o nejlepší dostupné stanice pro analýzu dlouhodobého klimatu (Peterson et al. 1997).


Snaze o homogenizaci dat bylo věnováno velké úsilí, nicméně zatím je jeho vliv na průměrné globální trendy teplot spíše menší. Na statistiky pro půlku kontinentu či menší však mají úpravy svůj vliv. Na jednotlivé datové soubory je pak tento vliv enormní. Tyto úpravy jsou v podstatě to jediné, co se dá v této oblasti dělat, jelikož existence kvalitních historických metadat je v globálním měřítku spíše výjimečnou záležitostí. Použití referenčních souborů dat, získaných z průměru okolních stanic však znamená, že upravený soubor více zachycuje regionální změnu klimatu než změnu na lokální úrovni. Z toho vyplývá, že nejlepší využití upravených dat je regionální analýza dlouhodobých klimatických trendů. Předpokládá se, že upravená data mají lepší vypovídací hodnotu pro analýzy dlouhodobého klimatu, nicméně originální série dat jsou také k dispozici v GHCN a mohou být používány při jiných výzkumech s výhodou hustšího pokrytí (Peterson et al. 1997).

3.4.6. Metadata

Typicky existují pro meteorologické stanice dva typy metadat. První typ vypovídá o změnách v čase. Mnoho zemí uchovávalo dokumenty s podrobnými údaji o historii stanice, obsahující užitečné informace, například jaký typ teploměru byl použit a kdy byl teploměr vyměněn. Tato metadata je velmi těžké až nemožné získat v globálním měřítku, proto nejsou k dispozici ani pro GHCN. Druhý typ metadat jsou informace o stanicích a jejich momentálním prostředí a stavu. Určité množství těchto metadat bylo shromážděno s účelem usnadnit výzkumné aplikace, používající GHCN (Peterson et al. 1997).

Jako u většiny ostatních databází dat z meteorologických stanic, tato metadata začínají jménem stanice, zeměpisnou šířkou a délkou a nadmořskou výškou. Pokud to bylo možné, byly tyto informace získány ze současných seznamů WMO.

Každá stanice v GHCN byla lokalizována pomocí série navigačních map ONC (Operational Navigation Charts). Tyto mapy v měřítku 1 : 1 000 000 byly vytvořeny Ministerstvem Obrany USA. Jelikož jsou dostupné přes NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), jsou tyto mapy využívány piloty z celého světa. ONC zachycuje vrstevnice, hranice urbanizovaných oblastí, polohy letišť a měst a pro většinu světa jednoduchou klasifikaci vegetace. Lokalizováním každé stanice GHCN se tvůrci snažili získat pět typů metadat:

1. *Populace*. Určením polohy stanice na  zjistíme, zda se stanice nachází v rurálním či urbánním prostředí. Pokud je to urbánní prostředí, populace příslušného sídla je zjišťována z různých zdrojů. Pro GHCN se používají tři klasifikační stupně velikosti populace: rurální, bez spojení s městem nad 10 000 obyvatel; malé město (10 000 – 50 000 obyvatel); urbánní

prostředí ve městě s více než 50 000 obyvateli. Jako dodatek k této obecné klasifikaci jsou uvedeny přibližné počty obyvatel dotyčných sídel (nad 10 000 obyvatel).

Tato populační metadata představují cenný nástroj pro analýzu klimatu, nicméně mají své limity. GHCN používá nejnovější verzi ONC, což však někdy znamená údaje staré deset nebo i více let. Takto stará data o poloze hranic měst nejsou již u rychle se rozvíjejících oblastí odpovídající. To samé se dá říct o velikosti populací. Pokud je to možné, používá GHCN aktuální demografické údaje, vydávané každoročně Organizací spojených národů (United Nations Demographic Yearbook). Naneštěstí jsou tato data dostupná pouze pro města s alespoň 100 000 obyvateli. Pro menší města jsou populační data získávána z jiných, méně kvalitních zdrojů, které jsou často zastaralé. Navíc toto představuje pouze jeden okamžik v čase. Dnes urbánní stanice mohly být před padesáti lety na farmě. Naopak pokud se dnes stanice nachází v rurálním prostředí, je velmi pravděpodobné, že tomu tak bylo i v minulosti. Jelikož je nutné se alespoň pokusit vypořádat s vlivem městského tepelného ostrova, doporučuje se při klimatických analýzách preferovat data ze stanic rurálního typu, nicméně síť těchto stanic je nedostačující (Peterson et al. 1997).

2. *Polohy letišť.* Letiště jsou samozřejmě jasně zaznamenány v mapách ONC. Pokud je nějaká stanice, vyskytující se v prověřovaném souboru dat, lokalizována na letišti, potom je tato skutečnost, spolu s údajem o vzdálenosti od přilehlého města (pokud je přítomno), zaznamenána jako součást metadat GHCN.

3. *Topografie.* ONC obsahuje poměrně detailní orografické údaje, které jsou dostupné pro piloty. Tyto informace byly využity pro klasifikaci topografie okolí stanice do tří skupin: ploché, kopcovité a horské. Navíc se rozlišují stanice v horském údolí a stanice na vrcholu hor, které mohou poskytnout unikátní pohled na klima těchto regionů.

4. *Pobřežní lokality*. Vliv oceánu na klima zde může být velký, metadata proto obsahují toto: (a) zda se stanice nachází na ostrově menším než 100 km², nebo s šířkou menší než 10 km v lokalitě stanice, (b) pokud je stanice umístěna do 30 km od pobřeží, je označena jako "pobřežní" a zaznamená se vzdálenost od pobřeží, (c) pokud je stanice lokalizována blízko velkého jezera (alespoň 25 km²), je nutné tento fakt zaznamenat, jelikož to může značně ovlivnit místní klima.

5. *Vegetace*. Jestliže je stanice v rurálním prostředí, měla by být zdokumentována místní vegetace. Klasifikace, kterou používá ONC rozlišuje krajinu na zalesněnou, otevřenou, bažinatou, ledovou a pouštní. Ne všechny mapy OCN mají kompletní vegetační metadata, takže nejsou k dispozici pro značnou část stanic. Další zdroj metadat o vegetaci a GHCN je zaznamenání typu vegetace podle mřížové vegetační sítě (Olson et al. 1983), kdy se bere v úvahu vegetace nejbližšího elementu sítě od stanice. Tato databáze vytváří globální vegetační mapu o 44 různých ekosystémových komplexech, zahrnujících sedm skupin ekosystémů. Tato metadata neobsahují přesný typ vegetace v lokalitě stanice a mohou mít tedy jen orientační vypovídací schopnost. Ve skutečnosti je klasifikace ekosystému často používána jako náhražka chybějících dat ze stanic, jelikož vegetace závisí z velké míry na klimatu (Peterson et al. 1997).

3.4.7. Aktualizace

Teplotní data z 31 různých zdrojů byla zařazena do GHCN. Mnoho z nich bylo získáno nestandardními metodami přes třetí osobu a některé byly digitalizovány speciálními

programy, přičemž nová data již nejsou k dispozici. Proto ne všechny stanice jsou schopny aktualizovat svá data, tím spíše pak regulérním způsobem. Z celkového počtu 31 zdrojů, pouze tři aktualizují měsíčně svá data regulérním způsobem. První z nich je U.S. HCN, obsahující data z 1221 převážně rurálních stanic v USA, zadruhé to je část souboru dat U.S. First Order station network čítající 371 stanic (převážně na letištích na americkém území, nebo v americkém teritoriu, jako jsou např. Karolínské a Maršalovy Ostrovy v západním Pacifiku) a 3) 1502 stanic iniciativy "Monthly Climatic Data for the World". Datové soubory z ostatních stanic budou aktualizovány, pokud budou k dispozici nová data (Hansen, 1999).

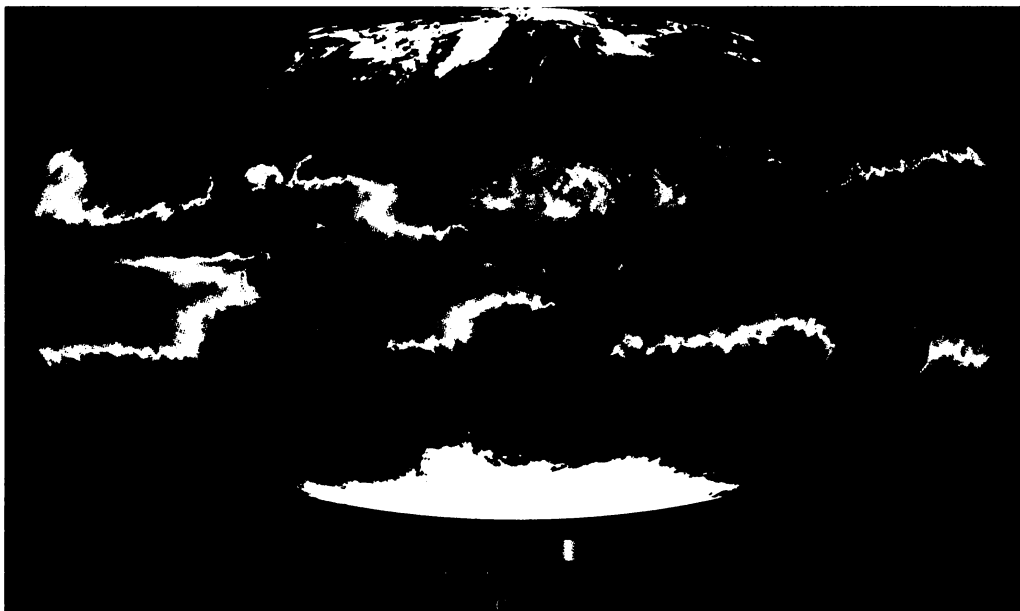
3.5. Povrchová teplota moře

Povrchová teplota moře (sea-surface temperature – SST) je důležitou součástí globální povrchové teploty, na které se provádějí analýzy klimatických změn, včetně analýz Mezivládního panelu pro změny klimatu (IPCC). Pokud odhlédneme od velmi řídké prostorové sítě míst, kde se uskutečnily měření, hlavní problém spočívá ve skutečnosti, že se za celou historii měření vystřídal mnoho metod, kterými se určovala teplota vody.

Historická data pocházejí většinou z obchodních či jiných lodí a první technikou měření SST bylo ponoření teploměru do vědra s vodou, které bylo mechanicky vytaženo z povrchové vrstvy moře. Není třeba říkat, že takto získaná data nejsou homogenní a obsahují mnoho chyb. První automatická metoda získávání SST spočívala v měření teploty vody v sacím otvoru velkých lodí. Tato měření také nebyla konzistentní, jelikož se u různých lodí lišila hloubka sacího otvoru, stejně jako místo, na kterém se teplota měřila. Poměrně přesná a snadno opakovatelná měření probíhala na upevněných bójích, kde se teplota měřila v hloubce přibližně jednoho metru. Po světě je rozmístěno mnoho bójí, které se liší designem a

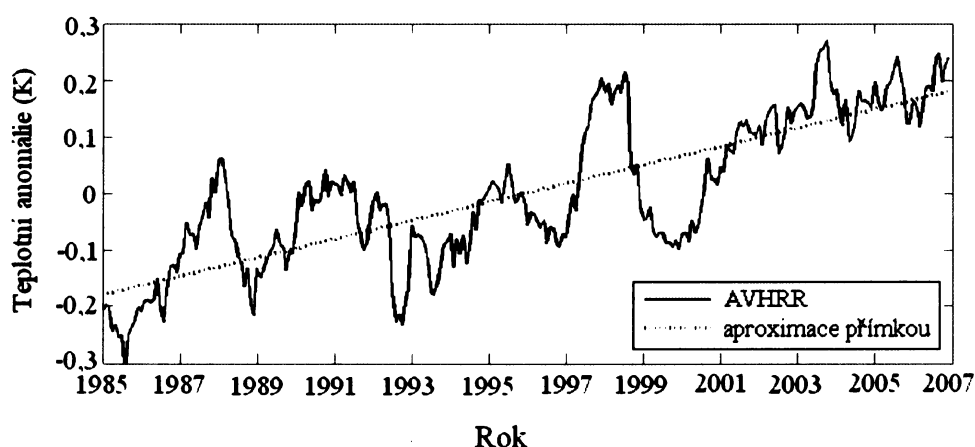
umístěním teplotních čidel. Nicméně je téměř nemožné získat informace o kalibraci jednotlivých teploměrů a vypovídací hodnota těchto dat v globálním kontextu je značně omezená (Wikipedia, 2009).

V 80. letech 20. století se začalo prosazovat satelitní měření SST, které znamenalo velký pokrok ve snaze monitorovat prostorové a časové variace povrchové teploty moře. Satelitní měření je mnohem více konsistentní a ve většině případů i přesnější než měření teploty in situ na lodích či bójích. Měření spočívá v detekci záření vydávaného oceánem na více vlnových délkách, většinou v infračervené oblasti elektromagnetického spektra. Tyto vlnové délky jsou vybírány tak, aby byly pokud možno blízko vrcholu křivky záření černého tělesa aplikované pro Zemi. Dalším předpokladem je aby záření vybraných vlnových délek dobře procházelo atmosférou. Satelitní měření SST poskytuje názorný pohled na odlišně teplé oblasti oceánu (obr. 20) a poměrně vysoká frekvence snímání umožňuje sledovat dynamiku vrchní vrstvy oceánu, což bylo dříve s daty z lodí a bójí vyloučené (NOAA, 2009).



Obrázek 20. Grafické znázornění teplot moří a oceánů, získané pomocí satelitního měření. Oblasti s vyššími povrchovými teplotami jsou označeny červeně, zatímco žlutá a zelená barva znamenají střední teploty. Modrá a fialová barva pak označuje studené vody, respektive led (NASA, 2009).

Přes nesporné výhody má satelitní měření povrchové teploty moře také svoje slabiny. Při snímání infračerveného záření z velké vzdálenosti je měřena teplota svrchní, velmi tenké vrstvy oceánu (cca 0,01 mm), která záření emituje. Tato teplota často nereprezentuje teplotu sloupce vody do hloubky jednoho metru. Děje se tak hlavně při ohřívání slunečními paprsky přes den a naopak při ztrátě tepla a vypařování. Je tedy velmi obtížné porovnávat data ze satelitů s těmi z bójí a lodí, což ještě víc komplikuje snahy o modelování globálního dlouhodobého trendu povrchové teploty oceánů. Navíc satelity nemohou "vidět" přes mraky, což způsobuje další zkreslení v trendech SST. Z uvedených faktů vyplývá, že satelitní měření SST je velmi užitečné k získání přibližné představy o rozložení a změnách teplot v oceánech, ale nejsou příliš vhodná k analýze globálního klimatu. Přesto se na nich tyto analýzy provádí, jelikož lepší data nejsou zatím k dispozici. Obrázek 21 ukazuje odhad trendu SST za posledních přibližně 20 let, který je vytvořen z dat přístroje AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), umístěném na NOAA-7, což je meteorologický satelit americké organizace NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) (NOAA, 2009).



Obrázek 21. Záznam průměrné globální SST, založený na datech AVHRR, měřených denně s rozlišením 0,25 stupňů zeměpisné šířky x 0,25 stupňů zeměpisné délky. Denní hodnoty SST jsou sloučeny do měsíčních průměrů a dále je matematickými metodami odstraněn vliv cyklu sezónních změn počasí. Čárkovanou čarou je vyznačena aproximace daných hodnot přímkou, která má vzestupný trend asi 0,016K/rok (0,16K/dekáda) (NOAA, 2009).

Z výše uvedených důvodů je třeba tento trend brát opravdu jen jako odhad, který lze navíc jen velmi obtížně zasadit do historického kontextu, jelikož historická data nemají dostatečnou kvalitu. Navíc je zde opomíjena voda ve větších hloubkách, která představuje největší energetický zásobník na Zemi. Pokud by se například změnila intenzita transportu tepla z povrchových vrstev oceánu do větších hloubek, mohlo by dojít k vertikálnímu přerozdělení tepelné energie v oceánu a povrchová vrstva by se mohla ochladit či oteplít, aniž by došlo ke změně celkové energie.

3.6. Průměrná globální teplota jako ukazatel změn klimatu

Širokou veřejností je přijímáno tvrzení, že zemská atmosféra a světový oceán se posledních 50 let oteplují. Základ této domněnky spočívá ve vzestupném trendu křivky na grafu, který vyjadřuje tzv. průměrnou globální teplotu. Ta vzniká promítnutím vzorků fluktuujícího teplotního pole na Zemi do jediné hodnoty v nespojitých měsíčních či ročních intervalech. Představuje tedy současně časový a prostorový průměr. Zastánci deklarují, že tato statistika představuje měření roční globální teploty s přesností $\pm 0,05$ °C. Kromě toho se dokonce domnívají, že malé změny v hodnotě globální teploty nahoru či dolů mají přímý a jednoznačný fyzikální vliv (Essex et al. 2006).

Tato statistika je uváděna jako „teplota“, jako by průměr teplot byl sám teplotou a jako by nerovnovážený klimatický systém měl pouze jednu teplotu. Nicméně průměr teplotních dat z nerovnováženého systému není teplotou a Země není v globální termodynamické rovnováze sama o sobě, ani ve vztahu ke svému okolí. Pokud se na Zemi díváme z vesmíru z takové vzdálenosti, že se jeví jako bodový zdroj, její záření se odchyluje od spektrálního rozložení černého tělesa, což značí, že nemá pouze jednu teplotu. Také neexistuje jednotná teplota

vrchního okraje atmosféry. Z těchto faktů vyplývá, že teplotní pole Země není termodynamicky zastupitelné jednou teplotou (Essex et al. 2006).

Statistika globální teploty je také označována jako průměr, jako by existoval pouze jeden druh průměru. Místo toho máme k dispozici nekonečné množství legitimních matematických možností. V meteorologii a klimatických studiích bylo použito přes sto různých průměrů a další se pravidelně objevují (Peterson et al., 1997). V případě teploty neexistuje jednoznačný způsob jak vybrat pouze jednu z nekonečného množství matematických možností. Mezinárodní organizace pro standardizaci (ISO) se snažila vybrat jedinou vhodnou metodu, ovšem neuspěla. Problémem není pouhá absence dohody, která by vybrala jedno z mnoha matematicky odlišných, ale fyzikálně ekvivalentních měření stejné veličiny. Problém spočívá v tom, že tato veličina neexistuje, protože neexistuje jedna globální teplota. Tento poznatek nicméně nezabrání tomu, aby byly počítány další a další průměry. Nemáme k dispozici žádnou experimentální nebo teoretickou cestu jak dokázat chybnost kteréhokoli výběru metody pro výpočet průměru, pokud je průměr teplotních dat (chybně) označován jako teplota sama. Označení průměrů za teploty vede k paradoxní situaci, kdy dvě náhodně vybrané metody aplikované na nerovnovážné pole mohou dát za vznik výsledkům, které se vzájemně vylučují. Nastává tak absurdní situace, kdy o tom, jestli se systém otepluje nebo naopak ochlazuje, rozhoduje výběr metody pro výpočet průměru. Východiskem z této situace nemůže být ani dohoda o používání jednotného výpočtu průměru. Řešení spočívá v uvědomění, že při použití termínů „oteplování“ a „ochlazování“ k vyjádření vzestupných či sestupných trendů v průměrech teplotních dat se jedná o zneužití terminologie. Statistiky mohou jít nahoru či dolů, ale kromě zvláštních případů nemůžeme na jejich základě říct, že se systém jako takový otepluje či ochlazuje (Essex et al. 2006).

Stejně tak nemůžeme očekávat, že se rozdílné statistiky, vzniklé použitím různých metod k výpočtu průměru, budou chovat stejně, pokud neměříme jednu, dobře definovanou

fyzikální veličinu. Naneštěstí je v klimatologických debatách už dlouho považováno za problém, že se dobře známé "globální teploty" chovají každá jinak. Debaty o tom, která z nich je správná, jsou z podstaty chybné a nemají žádný výsledek. Příčina tohoto rozporu spočívá v pokusu o odhad fyzikální veličiny, která ve skutečnosti neexistuje (Essex et al. 2006).

Pokud statistiky nejsou ve skutečnosti teplotami, čím tedy jsou? Mohou sloužit jako indicie, které nás varují před nebezpečím, nebo to jsou prostě jen vzorky z nekonečného množství výsledků výpočtů, které budou pokračovat do nekonečna? Do nedávné doby se zastánci globální teploty nemuseli touto otázkou zabývat. Neuváděli jak přesně vzestupné či sestupné trendy ve statistikách ovlivňují dynamiku a lokální podmínky v atmosféře a oceánech. Nicméně přesto už byly těmto změnám ve statistikách přičítány různé následky: malé nárůsty globální teploty byly označeny jako vysvětlení např. pro tvorbu hurikánů (Trenberth, 2006), virovou infekci u žab (Pounds et al., 2006), encefalitidu u koní a dokonce plicní nemoci, delirium a sebevraždy u lidí (Yoganathan, 2001).

Nešikovnost takových tvrzení není možná tak očividná, jelikož je koncept počítání průměrů velmi běžný. Ve skutečnosti je tak vše prostupující, že se může zdát nepřijatelné, podrobit ho kritice. Ovšem průměr může dávat smysl pouze za určitých okolností. Plat a výška člověka jsou smysluplné údaje na individuální úrovni a nepůsobí žádný problém je sčítat nebo z nich dělat průměr v rámci populace. Ale jsou zde zajisté příklady, u kterých tvorba průměrů či sčítání zcela zničí smysl proměnné. Například v ekonomii je směnný kurz smysluplný, pokud jsou porovnávány dvě měny, ale myšlenky "globálního směnného kurzu", nebo součtu kurzů jsou oboje nesmysly. Máme k dispozici dostatek dat, ze kterých by se dala vypočítat statistika analogická ke globální teplotě pro peněžní trhy, nicméně ani hodnota sama, ani její trend v čase by nám neposkytl žádnou smysluplnou informaci o globální ekonomice (Essex et al. 2006).

Pojmy být "globálně teplejší či studenější" pro nerovnovážný systém nejsou rozhodně beze smyslu. Miami v lednu, s teplotami v rozmezí řekněme od 20 do 30 °C, je určitě teplejší než Toronto s rozpětím přibližně -15 až -5 °C. Nicméně toto hodnocení není založeno na průměrech, ale na rozpětí teplot v příslušných teplotních polích. Pokud se rozpětí teplot nepřekrývají, všechny průměry se budou shodovat v tom, které pole se zdá teplejší. Výsledek je nezávislý na volbě metody pro výpočet průměru. To však neplatí pro srovnání teplotního pole Země v různých časových obdobích během pár let. Rozpětí teplot na Zemi (asi od -80 °C do +40 °C) je v podstatě pořád stejné pro obě období a v porovnání s ním jsou statistické trendy v průměrech (asi $\pm 0,1$ °C .rok⁻¹) o tři řády menší. V případech, kdy se rozpětí teplot vzájemně překrývají, ne všechny průměry daných dat souhlasí ve svých trendech a zpochybňují tak, co v tomto případě znamenají pojmy "teplejší" nebo "studenější" (Essex et al. 2006).

Je jasné, že se stále vyskytuje mnoho mylných představ o nerovnovážných teplotních polích, které jsou shrnuty v následujících bodech:

1. Součty nebo průměry jednotlivých teplot v teplotním poli nejsou samy o sobě teplotami. Stejně tak nejsou teplotami proxy data vnitřní energie pole.
2. Teploty pole nebo jejich průměry neřídí dynamiku prostředí. Dynamika je řízena gradienty a rozdíly v teplotách a ostatních proměnných.
3. Globální územní průměr nemůže být ukazatelem lokálních podmínek.
4. Užitečnost globálního průměru teplot Země, jakožto ukazatele globálních podmínek, byla mnohokrát deklarována, avšak nikdy nebyla dokázána.

5. Je snadné dokázat, že rozdílně vypočítané průměry teplot mohou mít opačný trend v čase (některé v čase rostou, zatímco jiné klesají). Je tomu tak, když se dvě porovnávané teplotní pole překrývají v rozsahu teplot, jak je tomu i u měření průměrné globální teploty.
6. Není možné vybrat jednu statistiku z mnoha, která by byla označena za ten pravý ukazatel globálního klimatu.
7. Pokud není jedna metoda upřednostněna před ostatními a současně mají některé statistiky vzestupný trend, zatímco ostatní naopak klesají, nemáme žádné možnosti jak odvodit zda se atmosféra jako celek otepluje nebo ochlazuje.

4. Sluneční záření a dlouhodobé změny klimatu

Jak bylo řečeno na začátku práce, značné variace solární konstanty se vyskytují poměrně pravidelně v jedenáctiletém cyklu slunečních skvrn. Variace se týkají nejvíce záření o krátkých vlnových délkách, které je absorbováno ve vrchní atmosféře. Změny solární konstanty se zhruba dají vysvětlit jako důsledek kombinace jevů, které způsobují pokles (sluneční skvrny), či naopak nárůst (fakulová pole). Oba tyto protichůdné jevy pozitivně korelují s magnetickou aktivitou Slunce a mají tendenci vzájemně eliminovat svůj vliv na

intenzitu záření. Výsledkem jejich zvýšeného současného působení během slunečního maxima je mírný růst solární konstanty. Důležitá otázka, která zůstává nezodpovězená, zní jak tyto poznatky aplikovat při zkoumání dlouhodobých změn solární konstanty, pokud jsou k dispozici pouze proxy data magnetické aktivity a množství slunečních skvrn. Ostatní jevy, způsobující variace v zářivém výkonu Slunce, by přitom neměly být opomíjeny. Tomu že takové jevy skutečně existují, nasvědčuje i fakt, že variace solární konstanty, naměřené prvními satelitními měřeními v roce 1980, jsou značně vyšší než hodnoty, které byly pro toto období zpětně předpovězeny v pozdějších letech. Naneštěstí jediné kontinuální pozorování, které proběhlo v dostatečně dlouhém časovém rozpětí desetiletí až staletí, jsou pozorování slunečních skvrn, která nám dávají představu o magnetické aktivitě Země. Z toho vyplývá, že pokud některé příčiny variací solární konstanty nejsou spojeny s magnetickou aktivitou, je zde velmi malá šance, že bude kdy prokázána jejich existence (Reid, 1995).

Je všeobecně známo, že maximální odchylka solární konstanty v rámci posledních několika cyklů slunečních skvrn činila asi $1,3 \text{ Wm}^{-2}$ (asi 0,1%) (Lockwood et al. 2007), což znamená změnu průměrně $0,23 \text{ Wm}^{-2}$ na zemském povrchu. To odpovídá předpokládané změně rovnovážné globální teploty povrchu Země asi o 0,14-0,18 K (Christiansen, 2005). Z důvodu velké tepelné kapacity oceánů však trvá dosažení rovnováhy daleko déle než 11 let, takže změny aktuální teploty, jakožto odezva na pozorované variace solární konstanty se zdají značně menší a jsou hůře identifikovatelné.

Z tohoto důvodu se pozornost vědců upřela na dlouhodobé změny solární konstanty, pro které zatím neexistuje přímý důkaz. Eddy (1977) si poprvé všiml toho, že Maunderovo minimum sluneční aktivity v pozdním 17. století, kdy sluneční skvrny zřejmě zcela vymizely po období několika desetiletí, se časově zhruba shoduje s nejchladnější částí tzv. Malé doby ledové v Evropě a Severní Americe. Tato skutečnost nasvědčuje značnému vlivu změn solární aktivity na klima na Zemi (Eddy, 1977).

Baliunas a Jastrow (1990) naměřili během 21. slunečního cyklu proxy data metodou porovnávání slunce a ostatních hvězd podobné velikosti. Tato data pak byla použita k odhadu solární konstanty v období Maunderova minima na hodnotu o 0,15 – 0,35% nižší než současná průměrná hodnota solární konstanty jednoho slunečního cyklu. Nezávislý odhad Baliunase a Jastrowa (1993), založený na podobném principu určil rozpětí na 0,1 - 0,7%. Baliunas a Jastrow (1993) usoudili, že snížení záření o 0,4%, což je průměrná hodnota z jimi vypočítaného rozpětí, je dostatečným vysvětlením nízké průměrné teploty během Malé doby ledové. Hoyt a Schatten (1993) použili veškerá dostupná proxy data intenzity slunečního záření k odhadu hodnoty solární konstanty v období Maunderova minima, který určil hodnotu solární konstanty asi o 5Wm^{-2} (0,35%) nižší, než je v současnosti, což zhruba souhlasí s ostatními odhady. Také byl použit model všeobecné cirkulace atmosféry k odhadu regionálních změn teploty způsobených poklesem solární konstanty o 0,25%, což je průměrná hodnota z rozpětí odhadnutého Leanem (1992). Výsledkem byl odhad poklesu rovnovážné globální teploty o $0,45^{\circ}\text{C}$ s nejasnými variacemi v závislosti na zeměpisné šířce a s největším efektem na pevninách. Změny v tepelném proudění, způsobené změnami v rozdílu teplot kontinentů a oceánů, by vedly v některých oblastech k významnému oteplení (Reid, 1995). Existuje tedy několik věrohodných teorií, které podporují názor, že změny solární konstanty hrály důležitou roli ve vzrůstu globální teploty, který údajně začal koncem 17. století a zřejmě i v dřívějších změnách klimatu v trvání řádu století. Jejich příspěvek k novodobějším změnám klimatu však stále zůstává v rovině spekulací a je to téma značně kontroverzní. Za účelem zhodnocení relativní důležitosti změn slunečního záření na povrchovou teplotu Země byly učiněny pokusy o zahrnutí ostatních zdrojů klimatických změn do modelových kalkulací. Schlesinger a Ramankutty (1992) nezávisle na sobě usoudili, že cyklické variace solární konstanty jsou zřejmě významným faktorem, ale dominantní podíl na změně klimatu má zvyšování emisí skleníkových plynů (Reid, 1995).

4.1. Jedenáctiletý sluneční cyklus a krátkodobé variace solární

konstanty

V literatuře lze nalézt dlouhou historii prezentovaných korelací mezi počasím a klimatickými anomáliemi různého druhu na jedné straně a změnami solární konstanty, často vyjádřenými jen počtem slunečních skvrn, na straně druhé. Oblast tohoto výzkumu získala špatnou pověst, hlavně kvůli několika případům, kde bylo podezření zaujatosti při výběru dat, nebo kde byl statistický význam pozorovaných korelací nepřesvědčivý. Nicméně v ostatních případech žádný z těchto problémů nenastal a zdá se, že výsledky vypovídaly o skutečném vztahu, přestože chybělo věrohodné vysvětlení těchto korelací (Reid, 1995).

Toto téma bylo v nedávných letech oživeno pracemi K. Labitzkeho v Německu a H. van Loona ve Spojených Státech. Ti pracovali na výzkumu významné periodické oscilace množství meteorologických parametrů, která, jak se zdá, je dobře synchronizována s jedenáctiletým slunečním cyklem. Tato oscilace byla původně objevena v teplotách stratosféry nad severními polárními oblastmi během zimy s tím, že její fáze je kromě slunečního cyklu závislá na fázi rovníkové "zhruba dvouleté oscilace" QBO (equatorial quasi-biennial oscillation) zonálních stratosférických větrů (Labitzke, 1987). Později byla objevena deseti až dvanáctiletá oscilace TTO (ten-to-twelve year oscillation), podmíněná chováním širokého spektra atmosférických parametrů, z nichž některé byly naměřeny v troposféře a jsou nezávislé na QBO (Labitzke a van Loon, 1992). Z výzkumu vyplynulo, že teploty v období července až srpna nad většinou severní polokoule jsou vyšší během slunečního maxima a nižší během minima. Zdá se, že tento vztah je statisticky prokazatelný (Labitzke a van Loon, 1992).

Zatímco tedy práce Labitzkeho a van Loona jasně ukázaly na přítomnost oscilace mnoha atmosférických parametrů s periodou blízkou jedenácti rokům a fází spojenou se

sluneční aktivitou, panuje neochota přijmout její vztah k jedenáctiletému slunečnímu cyklu. Skepse bude převládat tak dlouho, dokud nebude objeven věrohodný mechanismus přímo spojující Slunce a atmosféru. Jak již bylo zmíněno, vlivy jedenáctiletého cyklu sluneční aktivity na klima jsou tlumeny velkou tepelnou kapacitou oceánů a mohly by tedy být lépe patrné na teplotě kontinentů. Byly zaznamenány i další variace dlouhodobé teploty moří a pevniny a spřízněných meteorologických dat v trvání řádově desetiletí, přičemž za jednu z možných příčin tohoto jevu byly označeny změny v oceánské cirkulaci. Tato otázka je zatím velmi vzdálená od svého vyřešení a je značně důležitá pro pochopení změn globálního klimatu (Reid, 1995).

4.2. Působení slunečního větru

Slunce je zdrojem nejenom elektromagnetického záření, ale i horké plazmy ve formě slunečního větru. Ten je velice proměnlivý a jeho intenzita ovlivňuje tok kosmického záření vstupující do zemské magnetosféry v časovém horizontu od dnů až po desetiletí. Vztah mezi povrchovými větry a tokem kosmického záření byl zkoumán Andersenem (1992). Zaměřil se na období dvou tisíc let ve středním holocénu, kdy bylo geomagnetické pole Země poměrně slabé a dovolilo částicím kosmického záření ve zvýšené míře pronikat do atmosféry ve středních zeměpisných šířkách. Jakmile vysoce energetické částice kosmického záření proniknou do troposféry, ovlivňují v jisté míře počasí a klima na povrchu Země. V minulosti byla mnohokrát vyvíjena snaha o vyjádření obecného mechanismu tvorby oblaků. Zdá se, že tvorba cirrů ve vysokých nadmořských výškách je alespoň z části kontrolována ionizujícím zářením. Následné změny v míře tvorby mraků by pak mohly změnit bilanci záření v nižší atmosféře (Reid, 1995).

Na jinou možnou spojitost poukázali Tinsley a Deen (1991) a Tinsley et al. (1994), kteří si všimli množství korelací mezi změnami slunečního větru a kosmického záření a variacemi různých atmosférických parametrů, jako např. drah atlantických bouří, povrchových teplot a intenzity bouří. Usoudili, že by to mohlo být způsobeno variacemi v míře elektrického nabíjení podchlazené vody u vysoko položených oblaků. To by vedlo k formaci ledových krystalů, které by následovně klesaly do nižších poloh a ovlivňovaly teplotu oblaků středního patra. Změny v diabatickém teple by poté mohly kompletně změnit troposférickou cirkulaci. Tyto teorie jsou rozhodně zajímavé a zasluhují další výzkum, nicméně jejich nedílnou součástí jsou kroky, které zůstávají vysoce spekulativní. Pokud by se prokázalo, že procesy samotné skutečně probíhají podle úvah, stále by zůstala otázka, jestli hrají dominantní, nebo pouze okrajovou roli v ovlivnění klimatu na Zemi (Reid, 1995).

Výzkum v období let 1991 – 1994 nám poskytl náznaky možných spojitostí mezi sluneční proměnlivostí a globálním klimatem. Obecně nejlépe přijatý a uznávaný je mechanismus variací zářivého výkonu Slunce, které pokud jsou dost velké, mají nezpochybnitelný vliv na klima. Ovšem klima na Zemi je nejvíce ovlivňováno oceány, které jsou značně inertní vůči teplotním změnám a značně tak zmenšují pozorovatelný vliv krátkodobých variací slunečního záření. V ideálním případě by proto pozorování musela trvat řádově mnoho desetiletí až století, aby byl tento vliv eliminován. Dnes již téměř není pochyb o tom, že atmosféra vykazuje zřejmě periodické variace za časové období 10 – 12 let, avšak dokud neznáme mechanismus přímo propojující krátkodobé variace solární konstanty a počasí či klima, nelze pominout možnost, že je variabilita atmosférických parametrů v rámci dekád způsobena jinými procesy ve velmi nelineárním a komplikovaném klimatickém systému (Reid, 1995).

5. Závěr

Solární konstanta je od 80. let 20. století měřena pomocí radiometrů s aktivními dutinami, umístěnými na oběžné dráze Země, což přineslo velký pokrok v přesnosti měření a umožnilo sledování trendu intenzity slunečního záření v čase. Mezi hodnotami solární konstanty, které byly naměřeny různými radiometry ve stejném období, se však vyskytují rozdíly přibližně 5Wm^{-2} , což je více než předpokládaná nejistota měření jednotlivých přístrojů. Příčina není dosud zcela objasněna.

Přes tyto rozdíly je průběh změn hodnot solární konstanty, naměřené různými radiometry, přibližně stejný a kopíruje jedenáctiletý cyklus slunečních skvrn. Rozdíly se tedy netýkají průběhu změn sluneční aktivity nebo trendu v čase, ale "pouze" absolutních hodnot solární konstanty. Průměrná hodnota solární konstanty, naměřená nejstarším (HF) a nejnovějším (TIM) radiometrem se liší dokonce o 10Wm^{-2} a pohybuje se od 1361Wm^{-2} (HF) do 1371Wm^{-2} (TIM). Potenciální důvody rozdílů v naměřených hodnotách jsou: vliv chyb měření plochy průzoru radiometru a špatně nebo nedostatečně provedené korekce kvůli ohybu a rozptylu světla na povrchu radiometrů. Chyby dále způsobuje degradace materiálu radiometrů a vliv tepelného pozadí a Jouleova tepla. Obecně se dá říct, že každá provedená korekce zatěžuje výsledek určitou chybou a naopak nekorigovaná data jsou zkreslená například vlivem dlouhodobé degradace materiálu radiometrů.

Sloučené záznamy solární konstanty jsou upravené soubory dat, ve kterých jsou hodnoty solární konstanty, naměřené jednotlivými radiometry, posunuty tak, aby na sebe navazovaly. Tyto záznamy nám momentálně poskytují asi nejlepší představu o změnách intenzity slunečního záření v čase. Není však jasné, který ze tří konkurenčních sloučených záznamů solární konstanty nejlépe vystihuje skutečnost. Stoupající trend hodnoty solární konstanty během posledních několika desetiletí lze najít u sloučeného záznamu ACRIM.

Tento trend však činí pouze asi 0,037% za desetiletí a jeho případný vliv na klima nemůže vysvětlit proklamovaný růst globální teploty posledních desetiletích.

V případě solární konstanty je tedy měřena veličina, která jednoznačně existuje. Problémy při měření spočívají v technické nedokonalosti měřících přístrojů, v odlišnostech mezi nimi a v nutnosti provádět mnoho korekcí naměřených dat. V případě globální teploty je situace jiná, jelikož je zde "měřena" jakási nedostižná veličina, která by měla reprezentovat celé teplotní pole Země. Snaha o výpočet takové relevantní hodnoty z dat, která jsou k dispozici, se zdá být předem odsouzená k neúspěchu. Ačkoli zastánci konceptu průměrné globální teploty deklarují, že její hodnota představuje globální teplotu Země s přesností $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$, ve skutečnosti se přesnost měření nedá odhadnout, jelikož mimo jiné obsahují použitá data velké množství neznámých chyb.

Jediná hodnota průměrné globální teploty představuje zároveň časový a prostorový průměr. Časový průměr vzniká tak, že se na každé meteorologické stanici změří každý den několikrát teplota vzduchu, přičemž mezi stanicemi jsou velké rozdíly v počtu měření za den i v metodách výpočtu průměru. Těchto různých metod výpočtu průměru bylo použito více než sto. Dále se z denních průměrů vypočítají měsíční průměry a z nich následně průměry roční. Z těchto (odlišnými metodami vypočítaných) měsíčních či ročních průměrů se dále počítá průměr prostorový. Plocha Země je rozdělena klimatologickou sítí na 8000 stejně velkých obdélníkových ploch (elementů sítě). Průměrná teplota pro daný element se počítá jako průměr teplot všech stanic, která jsou na jeho území, přičemž počet těchto stanic se pohybuje od nuly po řádově stovky. Průměrná globální teplota Země se rovná průměru teplot všech elementů klimatologické sítě, které mají na svém území alespoň jednu meteorologickou stanici. Území, na kterých se žádná meteorologická stanice nenachází, jsou při tvorbě průměrné globální teploty ignorována.

Sít' meteorologických stanic, jejichž data představují hlavní zdroj pro výpočet průměrné globální teploty, je velmi nerovnoměrně rozložená. Zatímco v rozvinutých zemích Evropy a Severní Ameriky je tato síť poměrně hustá, v dalších oblastech světa je pokrytí daleko řidší, nebo žádné. V minulosti (hlavně pak před rokem 1950) bylo prostorové pokrytí Země stanicemi ještě daleko menší, což činí porovnávání současného klimatu s minulostí velmi problematické. Pokud porovnáme průměrné globální teploty dvou různých let v historii, porovnáme vlastně dvě hodnoty, vzniklé zprůměrnováním jiného počtu teplotních dat, naměřených na jiných stanicích, jinak rozmístěných po Zemi.

Neexistuje jednotná databáze, která by obsahovala teplotní data ze všech stanic. Klimatologové proto shánějí tato data různými (někdy poměrně nestandardními) metodami, jako je kontaktování kolegů, kteří by mohli nějaká data mít, nebo hledání dat na internetu. Výsledkem snah o shromáždění co největšího počtu teplotních dat je síť Global Historical Climatology Network (GHCN), která obsahuje více než 7000 souborů dat z meteorologických stanic. Dostupných souborů dat je daleko více, ale mnohé z nich byly vyřazeny jako duplikáty (opakující se data ze stejné stanice). Duplikáty však nejsou stoprocentně stejné, jejich identifikování je často obtížné a konečné rozhodnutí, zda konkrétní soubor dat zařadit či ne, bývá vysoce subjektivní. Mnoho duplikátů tak zůstalo zahrnuto v databázi GHCN a jejich data zkreslují celkový průměr.

Dalším problémem jsou různé změny, které proběhly během historie meteorologických stanic a mají vliv na měření. Takovou změnu může představovat například výměna teploměru za jiný typ, přemístění stanice, změny v okolí stanice, atd. Systém kontroly kvality dat GHCN se snaží tento vliv eliminovat převážně tak, že tato data nahradí průměrem teplot ze sousedních stanic. Při takovýchto úpravách vznikají uměle vytvořená teplotní data, která vůbec nemusí odpovídat realitě.

Globální teplotu Země velkou měrou ovlivňují oceány, které představují obrovské zásobníky tepelné energie. Jejich průměrná teplota, označovaná zkratkou SST, tedy tvoří velmi důležitou součást průměrné globální teploty. Historická data povrchové teploty moří, která byla naměřena na obchodních lodích, obsahují ohromná množství chyb. Novodobé měření pomocí satelitů zase poskytuje pouze hodnoty teplot velmi tenké svrchní vrstvy oceánů, přičemž teplota vody ve větších hloubkách je zcela ignorována.

Z výše uvedených faktů vyplývá, že k výpočtu relevantní hodnoty průměrné globální teploty nejsou k dispozici dostatečně kvalitní data a celý proces "měření" průměrné globální teploty nemá nic společného se seriózní vědou.

Poslední otázkou, na kterou zbývá odpovědět, je jak změny solární konstanty ovlivňují klima na Zemi. Vliv jedenáctiletého cyklu sluneční aktivity na klima se nezdá být příliš velký. Variace solární konstanty během tohoto cyklu odpovídají předpokládané změně rovnovážné globální teploty povrchu Země asi o 0,14-0,18 °C, nicméně tento vliv je tlumen velkou tepelnou kapacitou oceánů. Jelikož sluneční aktivita během cyklu periodicky stoupá a klesá, celkový vliv na klima se zdá být v podstatě nulový. Přesto existují výzkumy, které ukazují, že teploty nad většinou severní polokoule v období července až srpna jsou vyšší během slunečního maxima a nižší během minima, přičemž se zdá, že tento vztah je statisticky prokazatelný. Také sluneční vítr, jehož intenzita se v čase mění, může v jisté míře ovlivňovat počasí a klima na Zemi. V současnosti není vliv změn sluneční aktivity na klima příliš velký, jelikož ani variace solární konstanty v posledních desetiletích nedosahují velkých hodnot. Pokud by však sluneční aktivita na delší dobu výrazněji poklesla, jako tomu bylo v období Maunderova minima (přibližně mezi roky 1638 a 1715), mohla by se Země ocitnout na pokraji další malé doby ledové. Ačkoli tedy variace solární konstanty v dnešní době výrazně neovlivňují klima na Zemi, je jejich vliv v porovnání s vlivem skleníkových plynů často podceňován.



6. Seznam zkratek

ACRIM - Active Cavity Radiometer Irradiance

(radiometr s aktivními dutinami pro měření solární konstanty)

AU – astronomická jednotka (astronomical unit)

AVHRR – Advanced Very High Resolution Radiometer (radiometr s vysokým rozlišením)

CDIAC – Carbon Dioxide Information Analysis Center

(Centrum informací a analýz ohledně oxidu uhličitého)

DIARAD – Differential Absolute Radiometer (diferenční absolutní radiometr)

ERBE – the Earth Radiation Budget Experiment (radiometr na satelitu ERBS)

GHCN – Global Historical Climatology Network (Globální historická klimatologická síť)

GISS – Goddard Institute for Space Studies (Goddardův institut pro studium vesmíru, NASA)

HF – Hickey-Frieden radiometer

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (Mezivládní panel pro změnu klimatu)

NCDC – National Climatic Data Center (Národní centrum klimatických dat, USA)

NIST – National Institute of Standard and Technology

(Národní ústav pro standardizaci a technologie, USA)

NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration

ONC – Operational Navigation Charts (Operační navigační mapy)

PMO6V – jeden ze senzorů radiometru VIRGO na satelitu SOHO

SCAR - Scientific Committee on Antarctic Research (vědecký výbor antarktického výzkumu)

SOHO - Solar and Heliospheric Observatory (satelit pro výzkum Slunce)

SORCE – Solar Radiation and Climate Experiment

(satelit pro výzkum slunečního záření a klimatu)

SOVA – Solar Variability Experiment

SST – sea-surface temperature (povrchová teplota moří)

TIM – Total Irradiance Monitor (radiometr na satelitu SORCE)

UARS – Upper Atmosphere Research satellite (satelit pro výzkum vyšší atmosféry)

U.S. HCN – U. S. Historical Climatology Network (Historická klimatologická síť USA)

VIRGO - the Variability of solar Irradiance and Gravity Oscillations (radiometr)

WMO – World Meteorological Organization (Světová meteorologická organizace)

WWR – World Weather Records (Světové záznamy počasí)

7. Seznam literatury

ANDERSON, R.Y., Possible connection between surface winds, solar activity and the Earth's magnetic field, *Nature*, 358, 51-53, 1992.

BALIUNAS, S., JASTROW, R. Evidence for long-term brightness changes of solar-type stars, *Nature*, 348, 520-523, 1990.

BALIUNAS, S., JASTROW, R. Evidence on the climate impact of solar variations, *Energy*, 18, 1285-1295, 1993.

BÍLEK, Tomáš, et al. *Astronomia : Slunce* [online]. 2006 [cit. 2009-07-02]. Dostupný z WWW: <<http://astronomia.zcu.cz/>>.

BROHAN, P., et al. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new dataset from 1850. *Geophys. Res.* [online]. 2005 [cit. 2009-06-20]. Dostupný z WWW: <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/HadCRUT3_accepted.pdf>.

BUTLER, J.J., et al. Sources of differences in on-orbital total solar irradiance measurements and description of a proposed laboratory intercomparison. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology* [online]. 2008 [cit. 2009-04-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.thefreelibrary.com/Sources+of+differences+in+onorbital+total+solar+irradiance...-a0187996931>>.

CAIN, Fraser. Temperature of the Sun [online] *Universe Today*, [cit. 2009-07-29]. Dostupný z WWW: <<http://www.universetoday.com/guide-to-space/the-sun/temperature-of-the-sun/>>.

EDDY, J.A., Climate and the changing sun, *Clim. Change*, 1, 173-190, 1977.

ESSEX, Christopher , McKITRICK, Ross , ANDRESEN, Bjarne. Does a Global Temperature Exist?. *Non-Equilibrium Thermodynamics* [online]. 2006 [cit. 2009-04-02]. Dostupný z WWW: <<http://climatepolice.com/GlobalTemp.pdf>>.

FRÖHLICH, Claus. Total solar irradiance variability: What have we learned about its variability from the record of the last three solar cycles?. *Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos, World Radiation Center*. 2007 [cit. 2009-05-25]. Dostupný z WWW: <http://www.terrapub.co.jp/onlineproceedings/ste/CAWSES2007/pdf/CAWSES_217.pdf>.

FRÖHLICH, Claus. Construction of a Composite Total Solar Irradiance (TSI) Time Series from 1978 to present. *Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos, World Radiation Center*. 2006 [cit. 2009-06-13]. Dostupný z WWW: <<http://www.pmodwrc.ch/pmod.php?topic=tsi/composite/SolarConstant> >.

HANSEN, James. GISS (Goddard Institute for Space Studies) Surface Temperature Analysis [online]. 2001 , 2009 [cit. 2009-06-15]. Dostupný z WWW: <<http://data.giss.nasa.gov/gistemp/>>.

HANSEN, J., et al. GISS analysis of surface temperature change. *Journal of Geophysical Research* [online]. 1999, no. 104 [cit. 2009-06-25]. Dostupný z WWW: <http://pubs.giss.nasa.gov/docs/1999/1999_Hansen_etal.pdf>.

HANSEN, J.E., LEBEDEFF, S. 1987: Global trends of measured surface air temperature. *J. Geophys. Res.*, **92**, 13345-13372.

HOYT, D.V., SCHATTEN, K.H. A discussion of plausible solar irradiance variations, 1700-1992, *J. Geophys. Res.*, **98**, 18895-18906, 1993.

CHRISTIANSEN, F. Influence of Solar Activity Cycles on Earth's Climate. *Danish National Space Center*. 2005 [cit. 2009-05-17]. Dostupný z WWW: <http://www.space.dtu.dk/upload/institutter/space/forskning/06_projekter/isac/wp_501a.pdf>.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [online]. 2000 [cit. 2009-05-23]. Dostupný z WWW: <<http://www.ipcc.ch/>>.

KOPP, G., BUTLER, J., LAWRENCE, G. The Absolute Accuracy of Space-Borne TSI Instruments: A Summary From the July 2005 TSI Accuracy Workshop. *American Geophysical Union* [online]. 2005 [cit. 2009-06-07]. Dostupný z WWW: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/2005AGUFMSH33C..05K>>.

KUTÍLEK, Miroslav. *Racionálně o globálním oteplování*. [s.l.] : Dokořán, 2008. 185 s.

LABITZKE, K., H. VAN LOON, Association between the 11-year solar cycle and the atmosphere. Part V: Summer, *J. Climate*, 5, 240-251, 1992.

LABITZKE, K., Sunspots, the QBO, and the stratospheric temperature in the North Polar region, *Geophys. Res. Lett.*, 14, 535-537, 1987.

LEAN, J., W. LIVINGSTON, A. SKUMANICH, AND O. WHITE, Estimating the sun's radiative output during the Maunder Minimum, *Geophys. Res. Lett.* 19, 1591-1594, 1992.

LOCKWOOD, Mike, FRÖHLICH, Claus. Recent oppositely directed trends in solar climate forcings and the global mean surface air temperature. *Proceedings of the Royal Society A* [online]. 2007 [cit. 2009-08-25]. Dostupný z WWW: <<http://www.warwickhughes.com/agri/lockwood2007.pdf>>.

MOLDAN, Bedřich. *Geochemie atmosféry*. Praha : Academia, 1977. 158 s.

National Aeronautics and Space Administration (NASA) [online]. 2009 [cit. 2009-07-03]. Dostupný z WWW: <<http://www.nasa.gov/>>.

National Institute of Standard and Technology (NIST) [online]. 2000 , 2009 [cit. 2009-05-11]. Dostupný z WWW: <<http://www.nist.gov/index.html>>.

NOAA (The National Oceanic and Atmospheric Administration) [online]. 2009 [cit. 2009-07-09]. Dostupný z WWW: <<http://www.noaa.gov/>>.

OLSON, J. S., WATTS, J. A., ALLISON, L. J., 1983: Carbon in live vegetation of major world ecosystems. ORNL-5862, Environmental Science Division Publ. 1997, 164 s.

PETERSON, Thomas C., VOSE, Russell S. An Overview of the Global Historical Climatology Network Temperature Database. *Bulletin of the American Meteorological Society* [online]. 1997 [cit. 2009-03-02]. Dostupný z WWW: <<http://www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/research/Peterson-Vose-1997.pdf>>.

POUNDS, J., BUSTAMANTE, M., COLOMA, L., CONSUEGRA, J., FOGDEN, M., Widespread Amphibian Extinctions from Epidemic Disease Driven by Global Warming, *Nature*, 439, (12 January 2006) 161–167.

REID, G.C., Solar total irradiance variations and the global sea surface temperature record, *J. Geophys. Res.* 96, 2835-2844, 1991.

REID, George C. The sun-climate question: Is there a real connection? *Rev. Geophys.* [online]. 1995, vol. 33 [cit. 2009-01-25]. Dostupný z WWW: <<http://www.agu.org/revgeophys/reid00/reid00.html>>.

SEDLÁČEK, Miloš. *Teorie nejistoty měření* [online]. 2006 [cit. 2009-06-05]. Dostupný z WWW: <<http://www.cszt.cz/den%20metrologie/data/7%20Teorie%20neistoty%20mereni.pdf>>.

SCHATTEN, K.H., Heliographic latitude dependence of the sun's irradiance, *J. Geophys. Res.*, 98, 18907-18910, 1993.

SCHLESINGER, M.E., N. RAMANKUTTY, Implications for global warming of intercycle solar-irradiance variations, *Nature*, 360, 330-333, 1992.

STŘEŠTÍK, J. Globální teplota roste nepravidelně. *Bioclimatology and Natural Hazards* [online]. 2007 [cit. 2009-07-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.cbks.cz/SbornikPolana07/pdf/Strestik.pdf>>.

TINSLEY, B.A., G.W. DEEN, Apparent tropospheric response to MeV-GeV particle flux variations: a connection via electrofreezing of supercooled water in high-level clouds?, *J. Geophys. Res.*, 96, 22,283-22,296, 1991.

TINSLEY, B.A., J.T. HOEKSEMA, AND D.N. BAKER, Stratospheric volcanic aerosols and changes in air-earth current density at solar wind magnetic sector boundaries as conditions for the Wilcox tropospheric vorticity effect, *J. Geophys. Res.*, 99, 16,805-16,813, 1994.

TRENBERTH, K., Uncertainty in Hurricanes and Global Warming, *Science*, 308 (17 June 2005) 1753–1754.

YOGANATHAN, D., ROM, W. N., Medical Aspects of Global Warming, *American Journal of Industrial Medicine*, 40 (2001) 199–210.

VOSE, Russel, et al. Maximum and minimum temperature trends for the globe: an update through 2004. *NOAA National Climatic Data Center*. 2004 [cit. 2009-08-12]. Dostupný z WWW: <<ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/papers/200686amsp4.1rvfree.pdf>>.

Wikipedia, the free encyclopedia [online]. 2001 , 2009 [cit. 2009-04-18]. Dostupný z WWW: <<http://en.wikipedia.org>>.

