

Využitie satelitov pri monitorovaní klimatickej zmeny

M. Lapin: Satellites Using by Monitoring Climate Change. Život. Prostr., Vol. 43, No. 4, p. 212 – 215, 2009.

The paper is devoted to brief analysis of climate change issue, connected international activities and monitoring system. About 3000 reliable meteorological stations can be used for monitoring of long-term climatic changes on the whole Earth since 1951. Besides these also many aerologic, hydrologic, phenologic and other observing station networks can be utilized. Prior to 1951 the number of regular observing stations is still lower and only paleoclimatic reconstructions are possible before 1850. Satellite observation system is a new tool developed also for climatic changes monitoring in the 60th and 70th of the 20th century. There exist a number of satellites with sensors for measurements of the Earth and sea surface temperature, snow cover extent and depth, sea ice extent and concentration, soil moisture, atmospheric water content, cloudiness etc.

Klimatická zmena je novým fenoménom súčasnosti, ktorým sa zaoberajú vedci, ekonómovia, stratégovia a aj politici. Okolo tohto problému koluje aj nesmierne veľa zdanlivo seriózných informácií a rozporných názorov. Vyrovnanie sa s klimatickou zmenou prináša so sebou aj nemalé socioekonomické problémy a vysoké finančné náklady (v miliardách dolárov a eur), preto je pochopiteľné, že existujú záujmové skupiny, ktoré môžu na tomto probléme profitovať, ale aj výrazne strácať. Vyprofilovali sa skupiny tzv. klímaskeptikov a klímaalarmistov vo všetkých krajinách. Kým prví spochybňujú akýkoľvek podiel človeka na prebiehajúcej klimatickej zmene, druhí nekriticky zveličujú možné negatívne dôsledky aj malých globálnych a regionálnych zmien klímy.

Vedecká sféra stála od začiatku pred zložitým problémom. Už v r. 1979, keď bol na podnet OSN založený Svetový klimatický program (*World Climatic Programme – WCP*), vedci zdôraznili, že potrebujeme objektívny nástroj na identifikáciu, analýzu a predikciu klimatickej zmeny vyvolanej emisiou skleníkových plynov a aerosólov do atmosféry a zmenou využívania krajiny. Takým nástrojom mohli byť dlhé rady kvalitných meteorologických pozorovaní v globálnom rozsahu už od r. 1850 a kratšie rady pozorovaní iných komponentov prírodného prostredia. Časové rady sledovania socioekonomických zmien boli oveľa kratšie a oveľa menej spoľahlivé.

Keď sa začiatkom 60. rokov 20. storočia uviedlo na obežnú dráhu niekoľko satelitov s meraním a monitorom prvkov povrchu Zeme, otvorila sa aj možnosť sledovania meteorologických prvkov, predovšetkým v odľahlých a riedko osídlených oblastiach Zeme. Je zrejmé, že najväčšie úspechy sa dosiahli pri pozorovaní oblačnosti vo viditeľnom a infračervenom spektre, pretože kontrast jasnosti oblačnosti oproti bezoblačnému povrchu je veľmi veľký (vo viditeľnom spektre i v rozdieloch povrchovej teploty). Až v 70. rokoch sa podarilo dosiahnuť také technické zlepšenie, že bolo možné merať povrchovú teplotu Zeme (kontinentov a oceánov) s presnosťou vyššou ako 0,5 °C aj v prípade oblačnosti. Zdokonalilo sa aj meranie rozsahu a výšky snehovej pokrývky, rozsahu, hrúbky a koncentrácie morského ľadu, vlhkosti rôznych vrstiev atmosféry, vlhkosti pôdy, štruktúry oblačnosti vrátane padajúcich zrážok a množstva ďalších prvkov.

Vedecký pokrok a technické zlepšenia umožnili od r. 1979 robiť priebežne kombinované analýzy priamych pozemných meraní a satelitného monitoringu najdôležitejších meteorologických prvkov. Tak sa dali konštruovať mapy polí meteorologických prvkov z celého povrchu Zeme a začala sa reanalýza klasických meteorologických máp. Pri nej sa využíva hustejšia sieť kombinovaných meraní (pozemné a satelitné) a tzv. asimilácia pomocou modelov atmosférických procesov. Aj v najhustejšej sieti meraní sa totiž môžu objaviť údaje

chybné alebo ovplyvnené lokálnymi efektmi, ktoré „kazia“ objektívnu analýzu a konštrukciu meteorologických máp. Asimilácia je vlastne modelová predpoveď v čase nula, keď je jej najvyššia spoľahlivosť. Všetky polia meteorologických prvkov by mali byť vo vzájomnom súlade podľa matematicko-fyzikálnych modelov atmosférických procesov. Skúsenosti s touto činnosťou umožnili urobiť reanalýzu aj spätne od r. 1946 (odvtedy existuje aj hustejšia sieť meteorologických pozorovaní vo voľnej atmosfére). Od r. 1979 existujú reanalýzy polí skoro všetkých meteorologických prvkov, ktoré sa dajú využiť v monitoringu klimatickej zmeny v celosvetovom rozsahu.

Príklady globálneho monitoringu vybraných prvkov – teplota

Najčastejšie analyzovaným prvkom je *teplota vzduchu*. Jednak má najdlhšie rady spoľahlivých a kontinuálnych meraní s presnosťou $\pm 0,1$ °C, pričom metodika meraní je celosvetovo jednotná už od r. 1781 (Manheimská dohoda). Na druhej strane, hustejšia sieť merania teploty vzduchu na všetkých kontinentoch je až od r. 1850 (keď vzniklo viacero štátnych meteorologických služieb), a najmä od r. 1873 (založením IMO – *International Meteorological Organization* – Svetovej meteorologickej organizácie). Aj keď existuje na oceánoch niekoľko ukotvených bójí a v odľahlých oblastiach Zeme niekoľko automatizovaných a obsluhovaných staníc, je pokrytie časti Zeme nedostatočné. Dotýka sa to predovšetkým polárnych oblastí v zime a rozľahlých oceánov na južnej pologuli celoročne.

Vyhodnocovaním teploty vzduchu vo výške 2 m nad prirodzeným terénom a na povrchu morí sa zaoberá niekoľko významných inštitúcií, medzi ktorými má významné postavenie CRU (*Climatic Research Unit*) v Norwichi (<http://www.cru.uea.ac.uk/>). Druhým významným strediskom je NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration, Satellite and Information Service*) v USA, ktoré poskytuje každý mesiac vyhodnotenie globálnych analýz (<http://www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/research/2009/feb/global.html>). Obe dve strediská berú do úvahy aj satelitné merania teploty vzduchu a iných prvkov.

CRU používa na analýzu globálnej teploty vzduchu údaje z asi 3 000 vybraných staníc z celého sveta od r. 1951, na základe ktorých stanovuje odchýlky mesačných priemerov teploty vzduchu od dlhodobého priemeru na celej Zemi, na kontinentoch a oceánoch severnej a južnej pologule. Pred r. 1951 bol počet meracích staníc podstatne menší, preto je akceptovateľná presnosť globálnych a hemisférických priemerov odchýlok iba od r. 1850. Metodika odchýlok od štandardného normálu (dlhodobého priemeru 1961–1990) má viacero výhod, no predovšetkým ide o to, že takéto

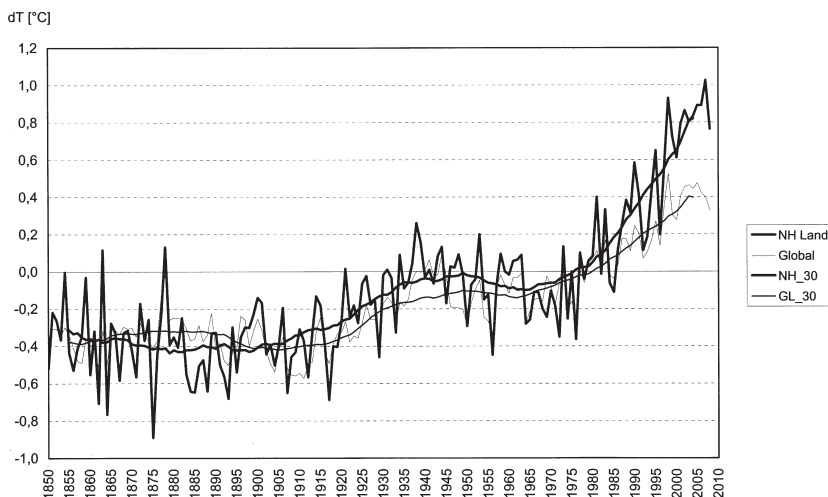
odchýlky majú malú priestorovú premenlivosť a sú aj málo závislé od nadmorskej výšky. Umožňuje to bez väčších problémov pripraviť stredné odchýlky mesačných priemerov teploty vzduchu od spomínaného normálu v horizontálnych boxoch gridov po $5^\circ \times 5^\circ$ na celej Zemi s vyššou presnosťou na kontinentoch severnej pologule. Za určitých okolností sa takto dajú dokonca použiť aj stanice ovplyvnené mestským ostrovom tepla. Z uvedeného vyplýva, že nepotrebujeme poznať presne ani globálny a ani hemisférický priemer teploty vzduchu na to, aby sme určili celkom presne odchýlku od štandardného normálu pre akékoľvek územie, kde existujú takéto pozorovacie stanice s dostatočnou priestorovou hustotou.

Metóda používaná v CRU a NOAA je náročná na presnejšie stanovenie poľa aktuálnych mesačných priemerov teploty vtedy, ak chceme poznať priestorové rozloženie odchýlok od dlhodobého priemeru na menšom území a v oblasti s malou hustotou pozemných meraní. Práve tu sa môžu uplatniť kombinované priame a satelitné merania.

Máme k dispozícii hodnoty odchýlok teploty vzduchu pre každý mesiac z databázy CRU od r. 1850 a NOAA od r. 1880 až po predchádzajúci mesiac po 25. dni v danom mesiaci. Nie je problémom pripraviť časové rady aktualizovaných mesačných a ročných odchýlok teploty vzduchu. Tieto údaje sú už časovo homogénne a možno ich použiť na spracovanie. Identifikáciu časového trendu možno urobiť iba na základe korektnej štatistickej analýzy, WMO odporúča aj na to použiť najmenej 30-ročný rad údajov (trend z kratšieho radu je zväčša nereprezentatívny).

Na obr. 1 a 2 sú elementárne možnosti spracovania a interpretácie trendovej analýzy údajov z databázy CRU. Časový rad odchýlok nie je stacionárny a vyznačuje sa jednak premenlivosťou (nepravidelným kolísaním) a aj časovým trendom. Premennosť podmieňuje pôsobenie viacerých faktorov v klimatickom systéme Zeme, napr. El Niño, vulkanické erupcie, solárna aktivita, náhodné vplyvy a i. (Lapin, 2009). Časový trend je však výsledkom pôsobenia systematického vplyvu nejakého faktora za podstatne dlhšie obdobie ako 11 rokov (priemerná dĺžka solárneho cyklu).

Z obr. 1 vyplýva: 1. časový priebeh ročných hodnôt odchýlok je dosť nepravidelný pre globálne údaje, ako aj pre hodnoty z kontinentov severnej pologule, 2. časový trend podľa údajov 30-ročných klzavých priemerov je dostatočne „hladký“, teda nevykazuje žiadne nepravidelné odchýlky, 3. údaje z kontinentov severnej pologule sa zreteľne odlišujú od údajov pre celú Zem podľa priemerov v určitých ucelených 30-ročných obdobiach. Použitie klzavých priemerov namiesto iných metód filtrácie a nelineárnych funkcií je v takomto rade opodstatnené. Násilné predlžovanie trendu po okraj časového radu vedie k miernej nepresnosti, pre-



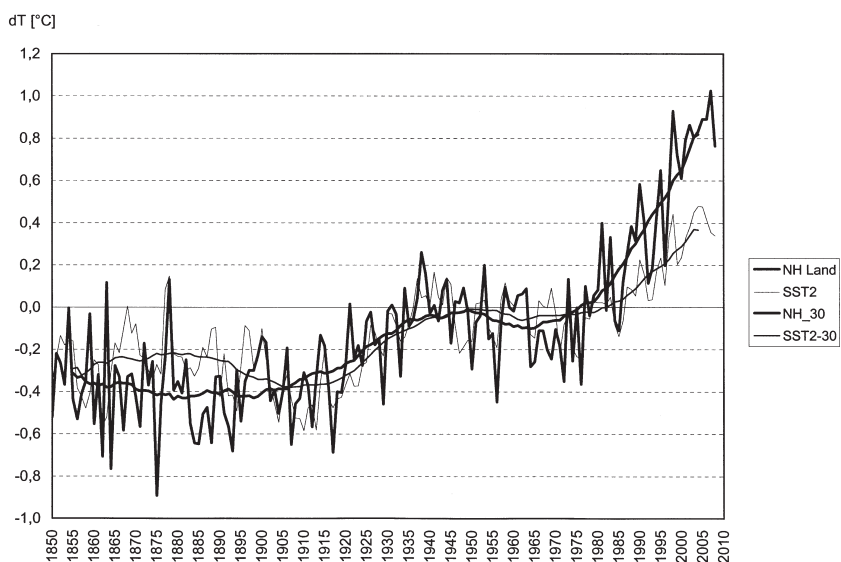
Obr. 1. Ročné priemery odchýlok teploty vzduchu od štandardného normálu (obdobie r. 1961 – 1990) na celej Zemi, na kontinentoch severnej pologule a ich 30-ročné kľzavé priemery.

Global – celá Zem; NH Land – severná pologufa a 30-ročné kľzavé priemery; NH_30 – hrubšia čiara reprezentuje 30-ročné kľzavé priemery z ročných hodnôt so stredom v 16. roku každého čiastkového obdobia, v r. 1994 je priemer za roky 1979 – 2008 a GL_30 – plná čiara, po r. 1994 a pred r. 1865 je použitá extrapolácia s postupne zníženým obdobím kľzavého priemeru až na 12 rokov.

Zdroj: <http://www.cru.uea.ac.uk/info>

Obr. 2. Ročné priemery odchýlok teploty vzduchu od štandardného normálu (obdobie 1961 – 1990): NH Land – na kontinentoch severnej pologule, SST2 – v oceánoch severnej pologule a 30-ročné kľzavé priemery, NH_30 reprezentuje 30-ročné kľzavé priemery z ročných hodnôt so stredom v 16. r. každého čiastkového obdobia, v r. 1994 je priemer za obdobie 1979 – 2008, SST2_30 – po r. 1994 a pred r. 1865 sa použila extrapolácia s postupne zníženým obdobím kľzavého priemeru až na 12 rokov.

Zdroj: <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/info>



to je na obr. 1 a 2 na okrajoch iba extrapolácia trendov po 12-ročný kľzavý priemer.

V období rokov 1865 – 1950 pozorujeme časový priebeh zladenej globálnej teploty nápadne korelujúci s časovým priebehom prichádzajúceho slnečného žiarenia k hornej hranici atmosféry (Lapin, 2009) a so solárnou aktivitou. Po r. 1950 došlo k poklesu globálnej teploty, ale najmä teploty na kontinentoch severnej pologule, pričom tento pokles je evidentne výraznejší ako pokles prichádzajúceho slnečného žiarenia. Uvedený pokles teploty vzduchu je v rozpore s rastúcou koncentráciou CO₂ v atmosfére (Lapin, 2008). Najpresvedčivejšie vysvetlenie tohto poklesu je v rýchлом raste síratých aerosólov po II. svetovej vojne, pretože až do r. 1975 sa v podstate nepoužívalo odsiřovanie spaľovaného uhlia. Výsledkom bol aj enormný nárast kyslých dažďov s veľkými škodami v lesoch na severnej pologuli. Tým možno vysvetliť rýchlejší pokles teploty na severnej ako na južnej pologuli. Po r. 1975 priemerná teplota na kontinentoch severnej pologule rástla evidentne rýchlejšie ako v priemere na celej Zemi, čo sa dá vysvetliť najmä tým, že sa prijal rad opatrení na zníženie škodlivých emisií, čoho výsledkom bol pokles síratých aerosólov. Tiež sa tu mohla podpísať skutočnosť, že antropogénny vplyv na klímu je väčší na severnej pologuli i to, že kontinenty reagujú na antropogénny vplyv rýchlejšie ako oceány (na severnej pologuli je viac kontinentov ako na južnej). Je zrejme, že časový rad v období 1979 – 2008 berie do úvahy aj satelitné merania, od r. 1950 rovnaký počet pozemných staníc a pred r. 1950 je postupne menej a menej spoľahlivý.

Zmeny teploty kontinentov a oceánov na severnej pologuli do istej miery naznačujú, ako smeruje odovzdávanie tepla (energie) medzi oceánmi a kontinentmi. Je známe, že na zmeny vonkajších klimato-

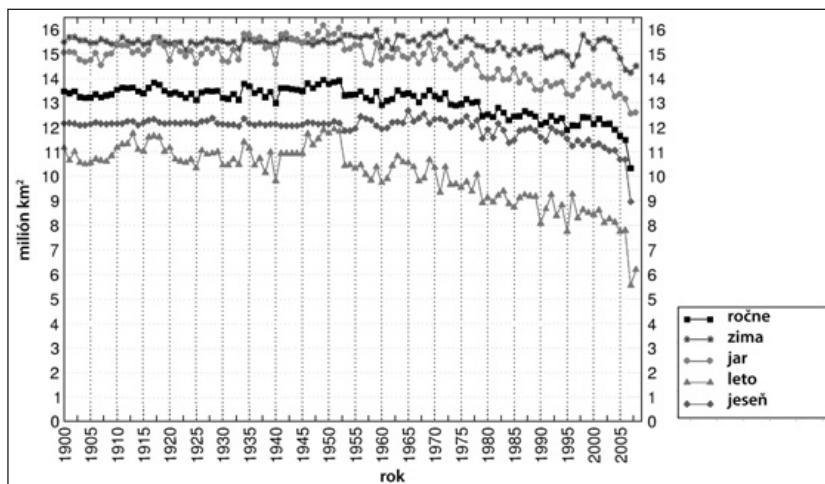
tvorných faktorov rýchlejšie reagujú kontinenty (obr. 2). Oceány majú veľkú tepelnú zotrvačnosť a sú schopné spomaľovať rýchlosť klimatickej zmeny na celej Zemi. Oveľa rýchlejšia rast teploty kontinentov severnej pologule po r. 1975 naznačuje, že tu musí existovať faktor, ktorý ich otepluje tak rýchlo, že sa získané teplo nestačí presúvať na ohrievanie povrchu oceánov, na strane jednej, na strane druhej, oceány nestačia zmiernovať tieto rýchle zmeny (Lapin, 2009).

Príklady globálneho monitoringu vybraných prvkov – morský ľad

Monitoring polárneho zaľadnenia (pevninské ľadovce, plávajúci morský ľad, šelfový ľad, permafrost) nadobúda v ostatných desaťročiach nebývalý význam. Zistilo sa, že polárna kryosféra veľmi citlivo reaguje už na malé zmeny klímy danej pologule. Detailnejšie sa budeme venovať iba plávajúcemu ľadu v Arktíde, ostatné analýzy možno nájsť na <http://nsidc.org/news/>, alebo na: <http://arctic.atmos.uiuc.edu/cryosphere/>, prípadne na <http://nsidc.org/data/atlas/> a i.

Podľa obr. 3, aj keď nie kontinuálne, predsa dochádza k významnému úbytku letného plávajúceho morského ľadu. V r. 2007 poklesla jeho plocha v septembri v mesačnom priemere na 4,28 mil. km², čo bola menej ako polovica z priemerného stavu v období 1900 – 1950 (http://nsidc.org/news/press/20081002_seaice_pressrelease.html). Menej plávajúceho ľadu v lete znamená aj viac zachyteného slnečného žiarenia (ľad má vysoké albedo v porovnaní s vodnou hladinou), ale tiež zmenu morského prúdenia. Navyše, Golským prúdom sa dostáva do Arktídy čoraz viac teplej vody z trópov (<http://www.wetterzentrale.de/pics/Reurst.html>). Meranie teploty povrchu oceánov je dnes už pomerne presné, samozrejme, predovšetkým vďaka satelitom. Vo všetkých prípadoch hrajú mimoriadne dôležitú úlohu podklady získané zo satelitných meraní, ktoré sú dnes zabezpečené ich viacnásobným prekrytím (http://www.star.nesdis.noaa.gov/star/smcdrc_rc_spb.php, detailnejšie Prabhakara et al., 2000).

Satelitný monitoring pomáha odstrániť obidva druhy spomenutých nedostatkov. Presnejšie merania na celom zemskom povrchu a v celej atmosfére Zeme dovoľujú



Obr. 3. Plocha plávajúceho morského ľadu na severnej pologuli v jednotlivých ročných obdobiach (1900 – 2008). Po r. 1979 sú kombinované satelitné a pozemné merania, do r. 1950 rekonštrukcia podľa obmedzených pozorovaní, v období 1950 – 1978 podrobné pozemné pozorovania). Zdroj: Arctic Climatic Research at the University of Illinois, USA

pripraviť spoľahlivejšie vstupy pre modelové výpočty. To zase umožňuje použiť detailnejšie a komplexnejšie fyzikálne procesy v atmosférických dynamických modeloch. Presné výsledky monitoringu klimatickej zmeny umožňujú tiež lepšie odlíšiť vplyv prirodzených faktorov zmien klímy od antropogénneho ovplyvnenia. Tak vieme pripraviť pre vedcov z iných odborov, decíznu sféru a politikov spoľahlivejšie a presvedčivejšie nástroje na presadzovanie zmiernujúcich a adaptačných opatrení, ktorých cieľom je spomalenie klimatickej zmeny a tiež zmiernenie jej možných negatívnych dôsledkov.

Príspevok vznikol za podpory riešenia projektu VEGA č. 1/4033/07.

Literatúra

- Lapin, M.: Klimatická zmena. www.dmc.fmph.uniba.sk/public_html/climate/20_20_20.doc, 2008.
- Lapin, M.: Niekoľko poznámok k trendom globálnej a hemisférickej teploty vzduchu. www.dmc.fmph.uniba.sk/public_html/climate/NIEKOLKO_POZNAMOK_K_TRENDOM_08.doc, 2009.
- Prabhakara, C., Iacovazzi, R., Jr., Yoo, J.-M., Dalu, G.: Global Warming. In: Evidence from Satellite Observations. Geophys. Res. Lett., 27, No. 21, 2000, p. 3 517 – 3 520.

Prof. RNDr. Milan Lapin, CSc., Katedra astronómie, fyziky Zeme a meteorológie Fakulty matematiky, fyziky a informatiky Univerzity Komenského, Mlynská dolina, F1, 842 48 Bratislava, lapin@fmph.uniba.sk