

DA LI SUNCE upravlja klimom na Zemlji?

Prof. Dr. Manfred Shussler, Max-Planck-Institut für Aeronomie, Kaltenburg-Lindau, Nemačka i dr. Dieter Schmitt, Universitäts-Sternwarte, Göttingen, Nemačka

Osim efekta staklene bašte, očividno je da i Sunčeva aktivnost ima primetan uticaj na globalno zagrevanje. Tačan obim ove aktivnosti kao ni svi fizički mehanizam pojave još nisu dovoljno jasni.

Sunce je pokretač zemaljskih vremenskih promena i klime. Ono zračenjem zagreva kontinente i okeane, pokreće vetrove i morske struje, prouzrokuje isparavanje vode, darujući nam pri tome kišu. Pri tome ovi uticaji nisu uvek bezuslovno jednaki. Promene Sunčevog zračenja u toku dana i noći, kao i u ritmu godišnjih doba poznate su nam vrlo dobro. Posto Zemljina osa stoji koso u odnosu na ravan ekliptike, Sunčevi zraci u zavisnosti od godišnjeg doba padaju manje ili više okomito. Sto je Sunce na nebu nize, to je količina toplote koja dospeva na tle manja. Periodične promene kretanja Zemlje, kao i nagiba njene ose, tokom desetina hiljada godina u neposrednoj su vezi sa pojavama ledenih doba.

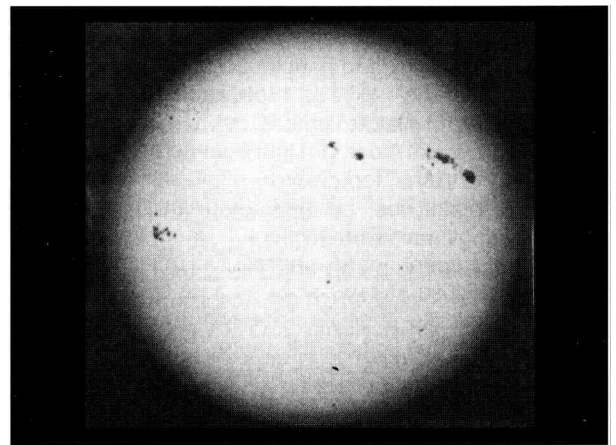
Međutim, i samo Sunce je podložno promenama. Početkom 17. veka otkrivene su tamne oblasti koje lutaju po svetlom Sunčevom disku: Sunčeve pege. Mada se o pri- rodi ovih pega još ništa nije znalo, odmah su se u prostom narodu pojavile spekulacije na temu da te pege mogu imati uticaja na Zemlju i na ljude.

Da li su možda Sunčeve pege uzročnici nepredvidljivih vremenskih čudi? Diskusija se dodatno rasplamsala kada je sredinom 19. veka otkriveno da broj Sunčevih pega varira u regularnom ritmu: svake jedanaeste godine pojavljuje se najveći broj pega. Tada je nastalo grozničavo pročešljavanje arhiva temperaturnih merenja i količina padavina da bi se potražila zavisnost sa 11-togodišnjim Sunčevim ciklusom. I ustanovljena je uzajamna veza između Sunčevog ciklusa i temperatura, stanja vode u velikim jezerima i učestanosti tropskih tajfuna. Primera radi, francuski astronom Kamij Flamarion (Camille Flammarion) 20 godina je pažljivo pratio prolećno buđenje kestena u aleji koja vodi do pariske astronomske opservatorije. Ustanovio je da su se u godinama sa velikim brojem Sunčevih pega cvetovi i mladi listovi pojavljivali dve do tri nedelje ranije nego u godinama kada je broj Sunčevih pega bio mali. Da li je onda u vreme velikog broja Sunčevih pega na Zemlji bilo toplije?

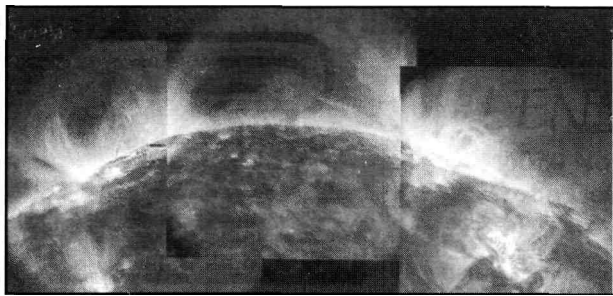
Problem kod ovakvih različitih studija bio je u tome sto je u periodu velikog broja Sunčevih pega na nekim mestima na Zemlji bilo toplije, a na drugim hladnije. Cesto se dešavalo da je kroz više decenija ustanovljena izrazi-

ta podudarnost, dok bi u nekom drugom periodu došlo do rasipanja podataka i do izvrnutih korelacija. Vremenom je prevladalo shvatanje da su prividne međusobne zavisnosti zasnovane samo na slučajnostima i na statističkim varkama. Naposljetku niko se nije hteo vise vraćati na detinjaste zaključke samo zato sto se npr. u nekoj zemlji istovremeno smanjuje broj roda i broj novorođenih beba. Oko 1950. došlo se već do toga da se istraživanja zavisnosti između Sunčeve aktivnosti i klime bezmalo tretiraju kao pseudonaučna.

Međutim, vetar je promenio smer, u početku skoro neprimetno, ali jasno. Merenja na raketama i satelitima u 60-tim i 70-tim godinama pokazala su da temperatura u spoljnim slojevima atmosfere na visinama iznad 100 km znatno oscilira tokom Sunčevog ciklusa. Uzrok tome je sto je Sunce u vreme velikog broja pega aktivnije, pri čemu emituje znatno jače ultraljubičaste zrake nego u go-



Slika 1. Tamne Sunčeve pege na površini Sunca. One se cesto pojavljuju u parovima i imaju prečnik od nekoliko hiljada do 50 000 km. Sunčeve pege izgledaju tamno zato sto je njihova temperatura od 4 000 stepeni za oko 2 000 K niza od okoline. Uzrok tome je magnetno polje, jako oko 0,4 Tesle, koje izlazi iz Sunčevih pega, a koje prigušuje konvektivni transport energije. Sunčeve pege obično žive nekoliko dana do nekoliko nedelja i „šetaju“ preko Sunčevog vidljivog diska od istoka ka zapadu (Izvor: High Altitude Observatory, NCAR, Boulder, Colorado)

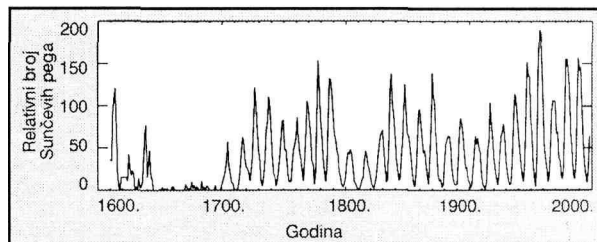


Slika 2. Magnetska polja između Sunčevih pega prostiru se u širokim lukovima sve do ivice Sunčeve atmosfere i doprinose zagrevanju Sunčeve korone preko jednog miliona stepeni. U ovom mozaiku koji je snimila svemirska sonda TRACE u kratkotalasnom ultraljubičastom opsegu vidi se kako se vrela gas okuplja oko magnetnih linija. Magnetska polja iniciraju slojevitost Sunčeve korone (Izvor: Lockheed Martin Solar and Astrophysics Laboratory, Palo Alto, California)

dinamika kada je broj pega minimalan. Gornji slojevi Zemljine atmosfere se apsorbovanjem ovog zračenja zagrevaju i u periodu maksimalnog broja pega dobar deo dozačene energije vraćaju u kosmos. To može imati drastične posledice: jak porast Sunčeve aktivnosti 1979. godine doveo je do toga da američka kosmička laboratorija „skajlab“ dospe u guste slojeve atmosfere i potpuno neplanirano padne na Zemlju. Međutim, Sunčev ciklus ostavlja svoj jasan pečat i na manjim visinama.

U nižoj stratosferi, na visinama iznad 10 km, otkrili su Karin Labicke (Karin Labitzke), iz Berlina, i Hari van Lun (Harri van Loon), iz Bouldera, oscilacije temperature i pritiska u ritmu sa ciklusom Sunčevih pega. Takođe često se dugotrajne oscilacije klime u blizini Zemljine površine odvijaju paralelno sa odgovarajućim varijacijama Sunčeve aktivnosti. Tako je, dok su u drugoj polovini 17. veka Sunčeve pege praktično potpuno iščezle, klima na Zemlji prolazila kroz veoma hladan period. U isto vreme porasla je koncentracija ugljenika 14C, kako je utvrđeno analizom godišnjih prstenova na drveću. Ugljenik 14C nastaje u gornjim slojevima atmosfere, pod dejstvom kosmičkog zračenja, koje se u vreme Sunčeve aktivnosti smanjuje dejstvom magnetnog polja u međuplanetarnom prostoru. Prema tome, ugljenik 14C je posredni indikator jačine Sunčeve aktivnosti koji je mogao na početku proučavanja Sunčevih pega da delimično i zavede. Ustanovljen je i jedan period sa veoma malim brojem Sunčevih pega od 1450. do 1550, kada su preovladivale neobičajeno hladne zime. Opet, u 12. veku veoma jake Sunčeve aktivnosti poklopile su se sa informacijama o jako izraženoj toploj klimi. Jasnu zavisnost između Sunčeve aktivnosti i klime ustanovili su Ejgil Fris-Kristensen (Eigil Friis-Christensen) i Knud Lasen (Knud Lassen), iz Kopenhagena, upoređujući trajanje pojedinih Sunčevih ciklusa sa temperaturama na severnoj Zemljinoj hemisferi: sto je ciklus Sunčevih pega kraci, sto je dakle brzi Sunčev „magnetski motor“, to je na Zemlji toplije. Pri tome može se pretpostaviti da se zbog velike termičke inercije okeana ne može ta pojava pratiti sa svakim pojedinačnim Sunčevim ciklusom, već je pre reč o uočljivom opštem trendu.

Da li ipak ove pojave ukazuju na međusobnu uzročnu zavisnost između Sunčeve aktivnosti i kolebanja klime na Zemlji? Ovo pitanje dobija u svojoj aktuelnosti u sklopu debate o uticaju porasta koncentracije gasova u atmosferi koji prouzrokuju efekat staklene bašte, a naročito povećanjem količine CO₂ usled izgaranja fosilnih goriva.

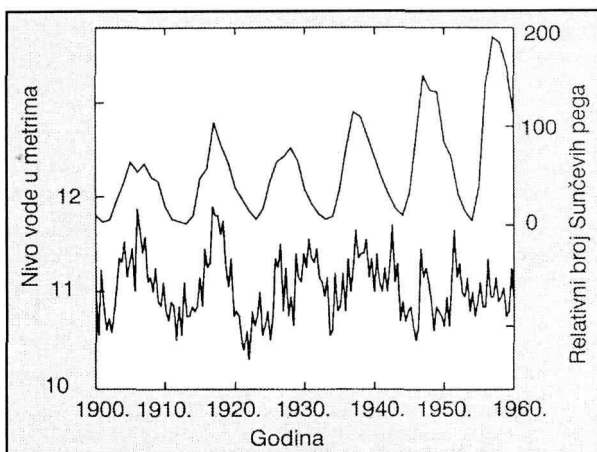


Slika 3. Broj Sunčevih pega oscilira u pravilnom ciklusu od oko 11 godina. Maksimumi se u svojoj brojnosti prilično razlikuju. U drugoj polovini 17. stoleća Sunce je bilo skoro bez svojih fleka (Izvor: H. Wohl, Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik, Freiburg)

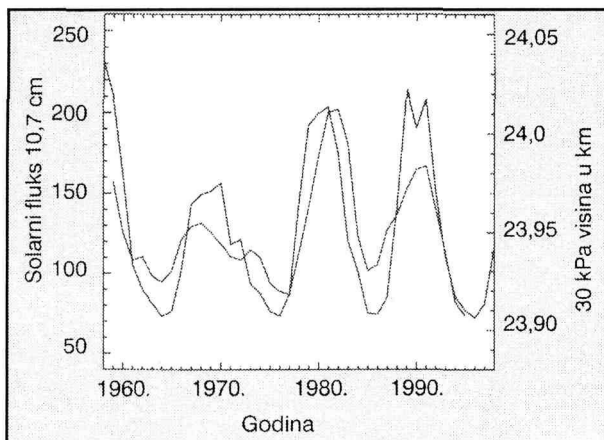
Koliki može biti udeo Sunčeve aktivnosti u globalnom zagrevanju Zemlje koje u dvadesetom veku, počev od 1900. godine iznosi 0,5 K? Da bi se na ovo pitanje odgovorilo, treba prvenstveno ustanoviti kakav je to fizički mehanizam Sunčeve aktivnosti koji utiče na klimatska događanja na Zemlji. Da li treba tamne Sunčeve pege „kriviti“ za pojave perioda toplije klime? Mogući odgovor na ovo pitanje mogu dati merenja dozačene energije Sunca na Zemlju, koja su putem veštačkih satelita obavljana počev od kraja sedamdesetih godina. Mada je ova vrednost od 1,37 KW/m² tradicionalno nazvana „solarnom konstantom“, pokazalo se da je ona ipak, mada neznatno, promenljiva.

U vreme pojavljivanja velikih Sunčevih pega vrednost dozačene energije se, kako se moglo i očekivati, kratkotrajno smanjuje do 0,2%. Iznenađujuće je, međutim, da ukupno uzev ova vrednost od minimuma do maksimuma pega naraste oko 0,1 %. Znaci da je Sunce u proseku svetlije kada ima puno tamnih pega! Za ovaj prividni paradoks posebno su odgovorna područja sa intenzivnim zračenjem, koja okružuju Sunčeve pege. Ti svetli prostori nadjačavaju tamne Sunčeve pege, tako da je Sunce u periodu svoje maksimalne aktivnosti svetlije nego u periodu minimalne aktivnosti.

Da li je moguće da su ova, ipak mala, kolebanja Sunčeve svetlosti odgovorna za klimu na Zemlji? Pre svega, logično bi bilo da se ustanovi kako se ukupno zračenje Sunca odvijalo u poslednjih 100 godina, pa to uporediti sa klimatskim podacima. Međutim, sve do 1978. godine ne postoje direktna merenja, tako da se intenzitet zra-



Slika 4. Mada se nivo vode u centralno-afričkom Viktorijinom jezeru menjao u istom ritmu sa Sunčevim ciklusom u periodu od 1900. do 1924. godine, u kasnijim godinama nije bilo moguće ustanoviti odgovarajuću zavisnost (Izvor: Hoyt/Schatten)

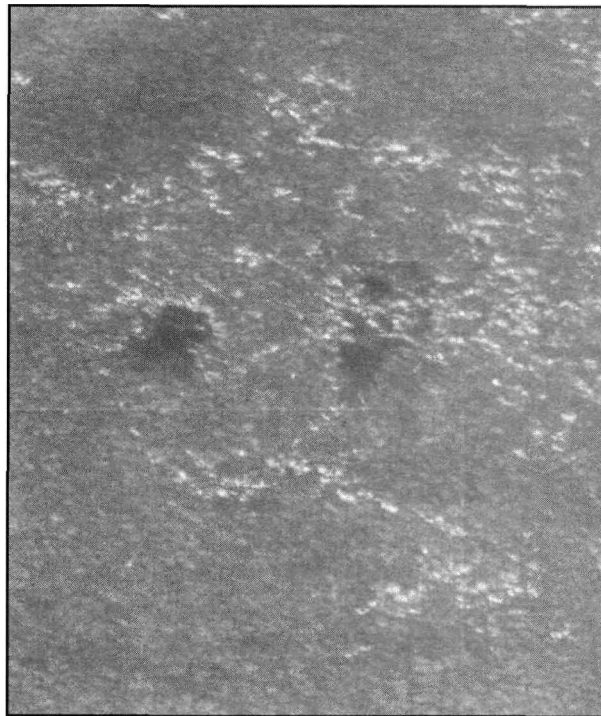


Slika 5. Vremensko kolebanje Sunčeve aktivnosti. ovde prikazano kroz srednji godišnji radiofluks na 11,7 cm i trogodišnje uprosocene 30 hPa visine na 30° sev. sir. i 150° zap. duž., pokazuju jasnu zavisnost Sunčevog ciklusa i karakteristika Zemljine stratosfere (Izvor: Labitzke)

čenja jedino može približno rekonstruisati iz zabeležaka o Sunčevim pegama i svetlim međuprostorima koje se nalaze u arhivama istraživača Sunca. Na ovaj način moguće je oceniti varijacije „solarne konstante“ za poslednjih 100 godina. U periodu od 1880. do 1940. godine ustanovljen je porast od 0,2%, zatim nastaje jedan ustaljeni period sve do 1970. godine, a zatim ponovni porast sve do današnjih dana. To je načelno u saglasnosti sa dugoročnim promenama temperature na Zemlji. Za drugu polovinu 17. veka (koja je bila takoreći bez Sunčevih pega), analize pokazuju da je intenzitet Sunčevog zračenja bio za 0,25 do 0,5% manji u odnosu na današnje stanje. Da bi se ispitala posledice variranja Sunčevog svetlosnog zračenja, korišćeni su specijalizovani kompjuterski programi koji omogućavaju da se sa unetim podacima registrovanog sunčevog zračenja mogu simulirati klimatska dešavanja. Rezultati ovakvih istraživanja ukazuju da je Sunce u poslednjih 100 godina uzročnik samo oko jedne trećine porasta temperature, dok najveći deo otpada na uticaj efekta staklene bašte.

Sa druge strane numerički modeli - u kojima su morale drastično da se pojednostave složene klimatske pojave - ne daju mesta nikakvoj sumnji. Tako se stagnacija temperature u periodu od 1940. do 1970. godine, uprkos povećanoj količini ugljen-dioksida u atmosferi, teško može uskladiti sa efektom staklene bašte, ali se zato vrlo dobro uklapa sa Sunčevom aktivnošću u to vreme. Ukupno uzev, ovi računski modeli nameću zaključak da varijacije Sunčevog zračenja u 20. veku bez ikakve sumnje imaju uticaj na klimatske promene, mada je u poslednjoj deceniji dominirao efekat staklene bašte.

Osim direktnog uticaja promenljivog zračenja, postoji, međutim, i jedan niz direktnih efekata Sunčevog zračenja koji mogu uticati na klimu. Jedan od tih se odnosi na oblake. Henrik Svensmark i Eigil Friis-Kristensen (Eigil Friis-Christensen) utvrdili su da je u periodu između minimuma Sunčeve aktivnosti 1987. godine i maksimuma 1990. globalna oblačnost bila smanjena za 3%. Pošto oblaci reflektuju dozračenu Sunčevu svetlost, to smanjenje oblačnosti u donjim slojevima atmosfere pro-uzrokuje izvestan porast temperature. Oba istraživača su postavila hipotezu da Sunčeva aktivnost utiče na kosmičko zračenje, a time na formiranje oblaka i u krajnjoj liniji na klimu.



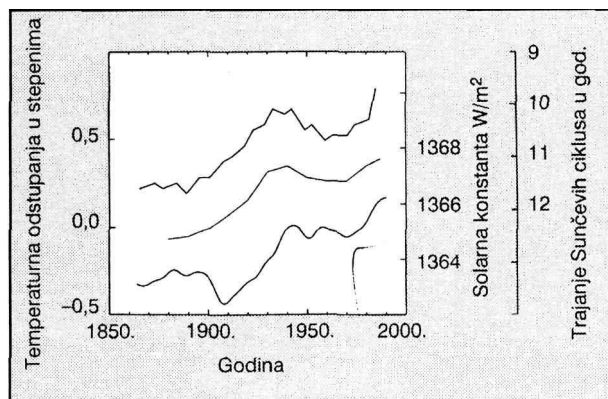
Slika 6. U okruženju tamnih Sunčevih pega nalaze se svetla polja. Oba fenomena prouzrokuje magnetno polje na Sunčevoj površini. Magnetno polje u području Sunčevih pega ometa transport energije iz Sunčeve unutrašnjosti, usled čega su ta područja hladnija i izgledaju tamno. Svetlija polja, naprotiv, izložena su većem broju slabijih magnetskih polja, zagrevaju se zračenjem i izgledaju svetlije. Sunčeve pege i svetla polja u njihovoj okolini doprinose oscilacijama ukupnog zračenja to-kom jedanaestogodišnjeg ciklusa (Izvor: G. Scharmer)

Energijom nabijeni korpuskuli kosmičkog zračenja stvaraju jezgra oko kojih se kondenzuje vodena para i formiraju oblake. Kada je Sunce veoma aktivno, smanjuje se kosmičko zračenje usled „magnetskih kišobrana“ u kosmičkom prostoru. Time se formira manje oblaka i temperatura raste. Analogno tome, u vreme smanjenja Sunčeve aktivnosti dolazi do snižavanja temperature. Moguće je da je Sunce ovim putem doprinelo zagrevanju Zemlje u poslednjih 100 godina više nego što bi se moglo očekivati samo od povećanja njegovog intenziteta zračenja. Fizika oblaka i njihov uticaj na klimu vrlo su kompleksni, tako da ne bi trebalo ovu hipotezu sasvim odbaciti, kao ni odustati od diskusije o sličnim mehanizmima.

Još jedan vid mogućeg uticaja Sunca na klimu je povećanje formiranja ozona u stratosferi usled pojačanog ultra-ljubičastog zračenja u vreme Sunčeve aktivnosti.

Ozon opet apsorbuje ostala područja ultravioletnog zračenja i tako zagreva stratosferu. Klimatski modeli koji simuliraju ovaj efekat vrlo dobro reprodukuju kolebanja atmosferske cirkulacije - koja je otkrila Karin Labicke (Karin Labitzke) sa svojim saradnicima - u ritmu Sunčevih ciklusa. I mali uzroci mogu izazvati velike posledice ako se dugotrajno ponavljaju i podležu povratnoj sprezi. Tako, neko malo zagrevanje, usled refleksije ledenog pokrivača, ili usled povećanja apsorbovanog Sunčevog zračenja nastalog porastom vegetacije, može da dovede do daljeg zagrevanja.

Mada su još mnoga pitanja otvorena, po svemu sudeći može se reci da Sunce ima bar neki udeo u globalnom porastu temperature u dvadesetom veku. Mi bismo vo-



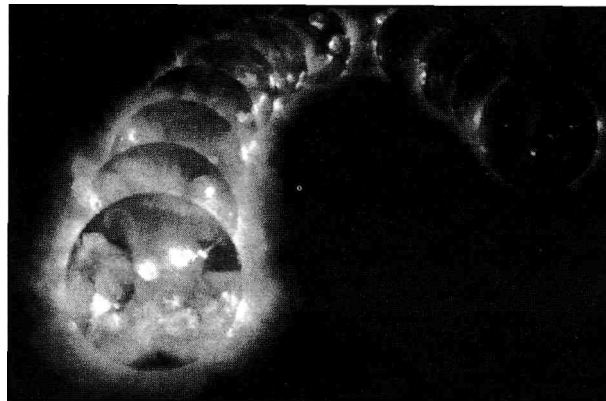
Slika 7. Promene srednje temperature na Zemlji, počev od 1880. godi ne, izvanredno dobro se poklapaju sa promenama Sunčevog svetlosnog zračenja prouzrokovanih ciklusom Sunčevih pega. Usporedne promene temperature i trajanja Sunčevih ciklusa mogu se sasvim pouzdano re-produkovati sve do 1700. godine (Izvori: S. K. Solanki and M. Fligge, 1998, *Geophysikal Research Letters* 25, 341; E. Friis-Christensen and K. Larsen, 1991, *Science* 254 i 698)

leli da saznamo sta se u budućnosti od Sunca može očekivati. Da li ce se nastaviti sadašnji porast njegove aktivnosti? Mi još uvek suviše malo poznajemo Sunce i njegove aktivnosti da bismo mogli praviti takve prognoze. Solarni fizičari imaju prednost u odnosu na istraživa-ce klime: mi poznajemo samo jednu planetu sa osobina-ma Zemlje - Zemlju, dokoni imaju veliki broj zvezda sličnih Suncu. Moguće je osmatranjem neke zvezde otkriti sta se može očekivati od Sunca. Tako se došlo do iznenađujućeg otkrića da zvezde sa približnim stepenom aktivnosti kao i Sunce pokazuju skoro bez izuzetka bitno veće varijacije svetlosnog zračenja u toku svog ciklusa aktivnosti nego sto je to slučaj sa Suncem. Da li je Sunce jedna netipična zvezda, ili se samo nalazi u fazi kada njegovo svetlosno zračenje ima blage varijacije? Da li možda vremenske čudi u istoriji Zemlje odslikavaju jedno veoma jako promenljivo Sunce u davnoj prošlosti?

Rezimirajmo današnja saznanja o ovoj temi. Jedanaestogodišnji Sunčev ciklus odražava se tu i tamo, neki put jasnije, neki put manje jasno na klimatska događanja, mada globalno gledano, izgleda da i drugi faktori veoma utiču. Posmatrano kroz duže periode vremena, zapaža se vidljiv uticaj Sunčevih promena na klimatska događanja, iako još nisu dovoljno jasni ni njegov obim ni fizički mehanizam pojava. Pitanje ko je uzročnik globalnog zagrevanja Zemlje u proteklom stoleću, Sunce ili ugljen--dioksid, po svoj prilici je pogrešno postavljeno: oba „osumnjičena" imaju svog udela u tome. Mi svakako možemo biti skoro sigurni da ce pri daljem porastu emisije ugljen-dioksida efekat staklene bašte sve više uzimati maha, a da postoje dobre indicije da se to već možda dogodilo 1970. godine.

Prof. Manfred Shussler, D. Sc. & Dieter Schmitt, D. Sc. DOES THE SUN CONTROL THE CLIMATE ON THE EARTH?

Summary Except the greenhouse effect, it is obvious that the Sun activity significantly influences on the global warming. The exact scope of this activity and real physical mechanism of this phenomenon are not still clear enough.



Slika 8. Rendgensko zračenje Sunca između 1991. i 1995; snimio ga je japanski satelit Yokohoh. Nasuprot malim promenama ukupnog svetlosnog zračenja, rendgensko zračenje se u toku Sunčevog ciklusa menja oko 100 puta. Rendgensko zračenje dolazi iz Sunčeve komore i vrlo malo utiče na ukupno zračenje Sunca (Izvor: Lockheed Martin Solar and Astrophysics Laboratory, Palo Alto, California)

Međutim, mi ne smemo da gubimo iz vida uticaj Sunčeve aktivnosti; svakako moramo nastojati da sto bolje proučimo uzroke njegovih promena i njegov uticaj na klimu, kako bismo znali sta možemo u budućnosti da očekujemo. Samo na taj način možemo podesiti naše ponašanje. Dakle, ima još mnogo posla i za klimatologe i za Sunčeve istraživače.

Literatura

- [1] Hoyt, D. V., K. H. Schatten: *The Role of the Sun in Climate Change*, Oxford University Press, 1997.
- [2] Labritzke, K. G.: *Die Stratosphäre: Phänomene, Geschichte, Relevanz*, Springer, 1999.
- [3] Lean, J.: *The Sun's Variable Radiation and its Relevance for Earth*, Annu. Rev. Astron. Astrophys, 35, 33, 1997.
- [4] ***: National Research Council: *Solar Influences on Global Change*, Washington, 1994.
- [5] Nesme-Ribes, E.: *The Solar Engine and its Influence on Terrestrial Atmosphere and Climate*, Springer, 1994.
- [6] Pap, J. M., S. Froehlich, H. D. Hudson, S. K. Solanki: *The Sun as a Variable Star*, Cambridge University Press, 1995.
- [7] Sonett, C. P., M. S. Giampapa, M. S. Matthews (Eds.): *The Sun in Time*, The University of Arizona Press, 1991.

Preveo Aleksandar Stefanović
dipl. inž.