

RAZGLEDI

OCEANI IN SPREMINJANJE PODNEBJA

AVTOR

† **Tomaž Vrhovec**

Naziv: dr., univerzitetni diplomirani meteorolog, docent

Naslov: Katedra za meteorologijo, Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani, Jadranska cesta 19, SI – 1000 Ljubljana

E-pošta: tomaz.vrhovec@uni-lj.si

UDK: 551.583:551.46

COBISS: 1.02

IZVLEČEK

Oceani in spreminjanje podnebja

Morja in oceani so bistveni v globalni energijski bilanci Zemlje ter močno vplivajo na shranjevanje in prenašanje energije. Prikazujemo, kakšne so energetske povezave med ozračjem in oceani in kako zaradi temperaturnih, slanostnih in vetrovnih razmer prihaja do kroženja oceanske vode na površju in v globini oceanov. Človeške dejavnosti postopoma povečujejo atmosferski učinek tople grede, kar se kaže v povečani temperaturi zraka in tal. Predstavljeni so nekateri predvideni učinki povečane temperature na oceane in na tokove v njih. Posebej obravnavamo vpliv teh sprememb na ledene površine na oceanih in celinah. Komentiramo tudi predvidene dvige gladine oceanov in premike obalne črte.

KLJUČNE BESEDE

oceani, klimatske spremembe, globalno segrevanje, oceanski tokovi, plavajoči in kontinentalni led, dvig gladine morja

ABSTRACT

The oceans and the climate change

The seas and oceans play a major role in the energy balance of the Earth. They influence the accumulation and the transport of energy in various forms. The energy exchange between the ocean surface and the atmosphere is shown and the horizontal transport of oceanic water is explained as a consequence of the temperature, salinity and wind fields. The surface and subsurface oceanic currents are discussed. Due to the anthropogenic forcing the atmospheric green house effect is increasing and the temperature of Earth's surface and atmosphere is increasing. Some effects of the increasing temperatures upon the oceans and their currents are described. Especially we discuss the effects of the temperature change upon the floating sea ice and upon the continental ice sheets as the mass balance of this ice is directly connected to the sea level change. We comment also the other factors influencing the sea level height and their relevance in the forthcoming climate change.

KEYWORDS

oceans, climate change, global warming, ocean currents, floating and continental ice sheets, sea level rise

Uredništvo je prispevek prejelo 26. januarja 2004.

1 Uvod

Vpliv oceanov in morij na energijske tokove, podnebje in vreme na Zemlji je bistven. Oceane si lahko predstavljamo kot velik energetski sistem, ki skrbi za pretvarjanje, shranjevanje in prenašanje energije. Odraž tega so oceanski in meteorološki pojavi različnih velikosti, od planetarnih pojavov kot je termohalidna cirkulacija, pojavov celinskih razsežnosti, kot so tropski tajfuni in cikloni zmernih širin, pa vse do lokalnih pojavov, kot so nevihte, oblaki, megle, kopenski in obmorski vetrovi. Tudi časovni intervali dogajanj v oceanih in v ozračju so zelo različni: od minut do stoletij. Če govorimo o podnebju, se večinoma ne ukvarjamo s procesi, ki imajo kratke življenjske dobe, pač pa nas zanimajo letna ali dolgodobna povprečja. Seveda so kot značilnost podnebja pomembne tudi pogostosti in jakosti pojavljanja kratkotrajnih procesov.

Za razumevanje podnebnih procesov v ozračju in dogajanja v oceanih, kjer se trajanje procesov meri tudi v stoletjih in kjer so odzivni časi na spremembe zunanjih vplivov dolgi, je pomembno razumevanje energetskih bilanc Zemlje kot celote, površja Zemlje ter posebej oceanov in ozračja. Skozi ozračje in po globinah oceanov se premikajo mase zraka in vode, s katerimi se prenaša tudi toplota, tako je za razumevanje dogajanja v ozračju in oceanih potrebna tridimenzionalna obravnava, saj nam točkovne, eno- in dvodimenzionalne predstave podajajo le poenostavljeno sliko. Glede na to, da so tri četrtine Zemlje prekrite z oceani, da je specifična toplotna kapaciteta vode vsaj dvakrat večja od kapacitet kopna in morja ter da je masa snovi, ki sodeluje v energetskih spremembah v oceanih, za nekaj velikostnih redov večja od mase ozračja, bi lahko rekli, da je stanje v ozračju le stranski učinek dogajanja v oceanih.

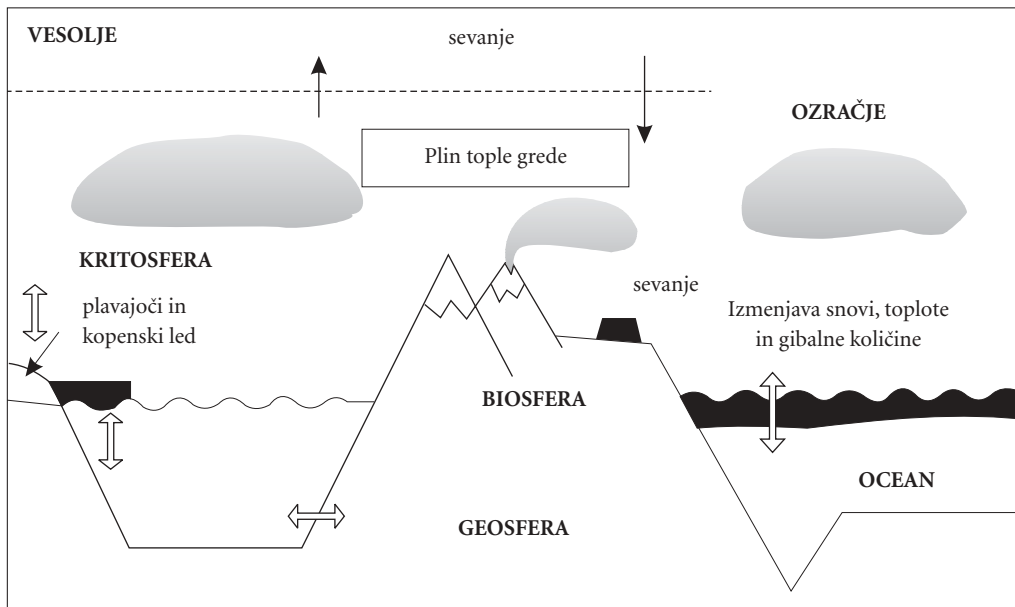
2 Energetski tokovi na površju oceanov

Ekvatorialna in tropska območja na Zemlji dobijo od Sonca s kratkovalovnim sevanjem povprečno dosti več energije kot polarni kraji (Rakovec, Vrhovec 2000). Zemeljsko površje ter sevalci v ozračju oddajajo energijo z dolgovalovnim sevanjem, tako da ostaja povprečna temperatura posameznega kraja na Zemlji približno stalna. Razlika med prejetimi in oddanimi sevalnimi energetskimi tokovi posameznega dela zemeljske površine pa ni nič, zato se ta energija pretaka med posameznimi deli atmosfere in hidrosfere. Temperaturne razlike poganjajo toplotne tokove s površja v globine morja in kopnega ter v višine ozračja. Toplota se od bolj vročih krajev k hladnejšim prenaša tudi v vodoravni smeri z morskimi tokovi in vetrovi.

Zaradi večanja učinka tople grede se temperatura Zemljinega površja in ozračja postopoma povišuje. Višanje temperature ni enako po vsej Zemlji in temperaturne razlike se s časom spreminjajo.

Oceani so orjaški shranjevalniki toplote. V primerjavi s kopnim, ki odbija precej sončne svetlobe in kjer se svetloba vpija le na površju, se na morski gladini odbija le malo sončne energije, hkrati se v morju svetloba vsrkava v površinski plasti, debeli nekaj deset metrov. Tako se v morju segreva ali ohlaja dosti večja masa kot na kopnem, pa tudi toplotna kapaciteta vode je dvakrat večja od toplotne kapacitete tal. Ker morja odbijejo bistveno manj sončnega sevanja kot kopno, so videti temna in imajo majhen albedo. Zaradi shranjevanja toplote delujejo morja in oceani kot blažilci temperaturnih nihanj in ekstremov.

Tudi nesevalni energijski tokovi na površju oceanov se razlikujejo od tistih na površju kopnega. Konvektivni tok toplote v globino morja ali iz nje na površje je predvsem posledica turbulence – mešanja površinski plasti morja nad termoklino. Termoklina je plast izrazitega padca temperature vode z globino in zaradi svoje stabilnosti onemogoča vertikalna gibanja skozi njo, podobno kot inverzije v ozračju. Ker se globina in jakost termokline spreminjata (poleti je izrazitejša in plitvejša, saj je morje v zgornjih plasteh toplejše), je prenašanje toplote v globlje plasti morja (pod 100 metrov) pozimi lažje kot poleti. V plitvih morjih, kot je severni Jadran, se voda pozimi premeša vse do dna. Če se morje na površini ohladi, je turbulentno mešanje lažje. Če je površina morja zelo hladna, potem gostejša površinska voda tone in na njeno mesto prihaja redkejša toplejša voda iz globin. Toplota se tako konvekcijsko prenaša



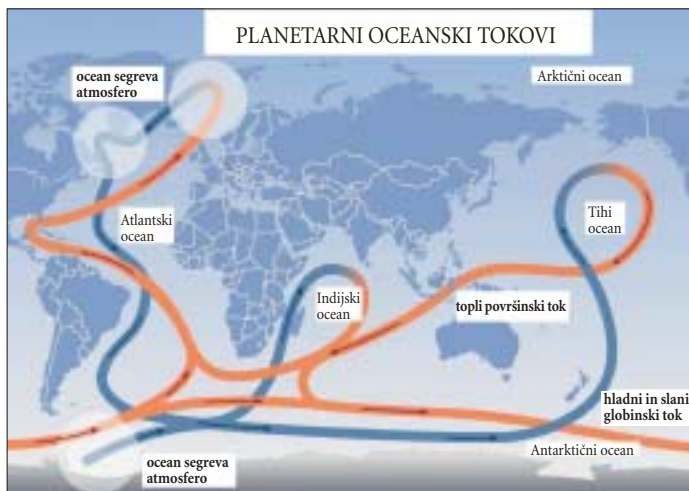
Slika 1: Sestavni deli klimatskega sistema na Zemlji in njihove povezave.

iz globine morja na površje in tam lahko segreva zrak. V tropskih krajih so temperaturne razlike med površinsko in globinsko vodo večje, mešanja je zato tam manj, izrazitejše je v manj stabilnih območjih zmernih in polarnih širin.

Na dviganje in spuščanje vode v oceanih bistveno vpliva tudi razporeditev celin in oblika morskega dna. Če vetrovi odpravljajo površinsko toplo vodo stran od obal, potem se tam dviga globinska voda. V tropskih krajih pihajo stalni vzhodni vetrovi, zato se hladna voda dviga na zahodni strani celin, v zmernih geografskih širinah pa pihajo stalni vetrovi od zahoda in zato prihaja globinska voda na površje na vzhodni strani celin. Na vertikalno mešanje morske vode vplivajo tudi razlike v slanosti. Bolj slana voda je gostejša in tone, manj slana voda se zadržuje na površju. V vročih krajih površinska voda izhlapeva, povečuje se slanost in takšna voda se spušča, na površju jo nadomešča hladnejša in manj slana. Ob izlivih velikih rek je morje nekoliko »osladkano«, sladka voda se razleže po površini morja in se turbulentno meša z morskno vodo na stiku med obema masama. Mešanje poteka v vertikalni smeri, razlika v slanosti ob izlivih rek pa je tudi eden od vzrokov za morske tokove.

Mešanje globoke in površinske vode je tudi posledica vetrovnih razmer: razburkano morje omogoča večji pretok toplote v globino. Hkrati ima razburkano morje večjo površino od mirnega in izmenjava z ozračjem je zato lažja.

Tok zaznavne toplote med morjem in ozračjem prek dneva, med letnimi časi in zaradi sprememb vremena spreminja smer. Ker se temperatura morja spreminja počasneje od temperature zraka (advекcijske spremembe temperature so v zraku dosti večje, ker so vetrovi dosti hitrejši od morskih tokov), se smer energijskega toka ravna po temperaturi zraka. Če pride hladen zrak nad morje, se zgornja plast morja hladi, zrak se segreva, toplota teče iz morja v ozračje. Ohlajanje zgornje plasti morja pa vodi k zmanjšanju stabilnosti v morju in zato se tedaj lažje vertikalno meša. Morje jeseni segreva zrak, spomladi pa ga večinoma hladi. Če prek hladnega morja piha topel veter, se morje od zraka le malo segreje, saj je tedaj v ozračju pri tleh stabilna temperaturna inverzija, ki zavira prenos toplote, hkrati pa je toplotna kapaciteta morja dosti večja od kapacitete zraka. Do izrazitega ohlajanja morja zaradi dotoka hladnega zraka prihaja na nekaterih delih polarnih in subpolarnih morij. Tam se zato zmanjšuje vertikalna



Slika 2: Oceanski tokovi – termohalidna cirkulacije (<http://www.ipcc.ch/present/graphics.htm>).

stabilnost morske vode in prihaja do izrazitega mešanja. Velikost toka zaznavne toplote iz morja v ozračje je odvisna predvsem od turbulence v ozračju: če pihajo močni vetrovi, je morje valovito, hkrati je mešanje v ozračju in v oceanu izrazito, turbulenca pa zmanjšuje stabilnost ozračja.

Eden najpomembnejših energijskih tokov na meji med oceanom in ozračjem je tok latentne toplote, povezan z izhlapevanjem morske vode. Zaradi izhlapevanja vodne pare se površina morja ohlaja. Velikost toka vodne pare in s tem povezana intenziteta ohlajanja morske gladine sta odvisna od temperaturnih razmer v ozračju in morju: pri visokih temperaturah zraka je izhlapevanje močno. Poleg tega je izhlapevanje odvisno od količine vlage v zraku: če nad morje priteče suh zrak, je izhlapevanje močno. Količina vlage, ki jo lahko sprejme zrak, je eksponentno odvisna od temperature zraka (Claiuss-Clapeyronova enačba, Rakovec, Vrhovec 2000), tako da je izhlapevanje pri 30° C kar sedemkrat izrazitejše kot pri 0° C pri enaki absolutni vlagi. Na izhlapevanje bistveno vpliva tudi mešanje v ozračju, saj vetrovna turbulenca odstranjuje nasičeni zrak iznad morske gladine. Tok latentne toplote je sorazmeren z maso izhlapele vode in z izparilno toploto za vodo, ki je kar 2,5 MJ/kg. Tok latentne toplote učinkovito ohlaja morsko vodo, saj se z izhlapitvijo 1 kg vode ohladi kar 60 kg vode za 10 stopinj.

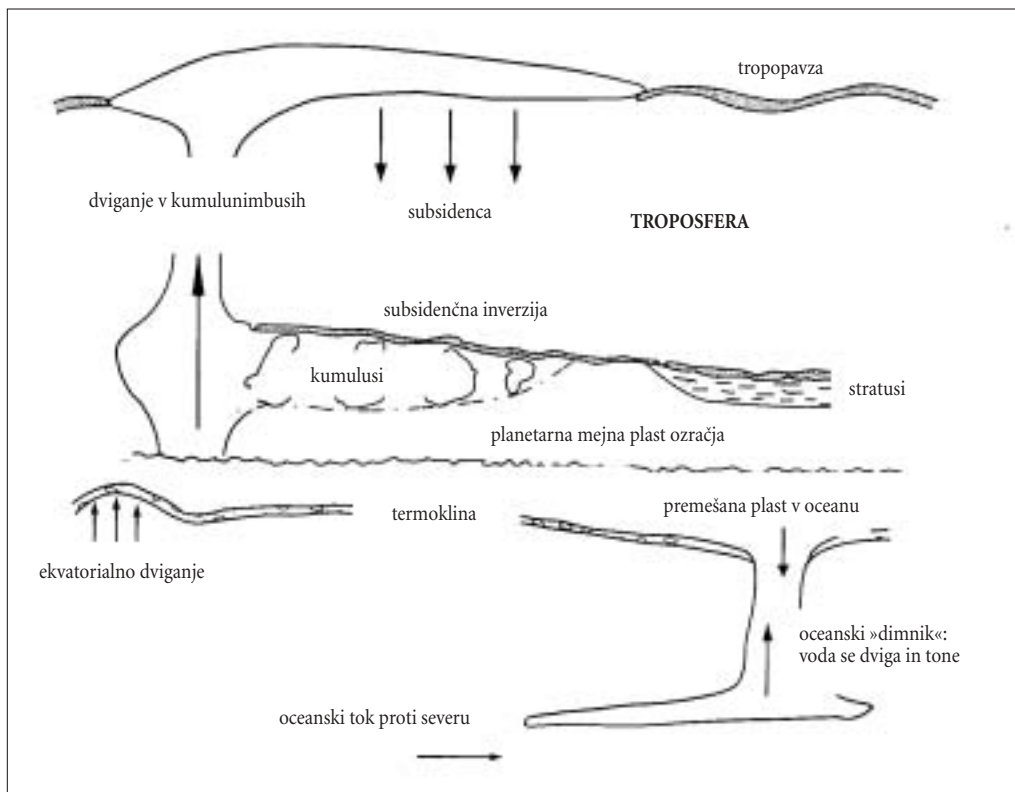
Kombinacija toka zaznavne in latentne toplote je tista, ki skupaj določa glavnino energetskega toka na meji med oceani in ozračjem: morje se najbolj ohladi, če nadenj pripiha močan, zmerno hladen in suh veter. Takšna je pri nas burja. Ta hkrati tudi odrine stran od obale toplo površinsko vodo in morje se tedaj v kratkem času zaradi dviganja hladne vode in izhlapevanja ohladi za nekaj stopinj.

Oceani so glavni vir vodne pare za ozračje. Najmočnejše izparevajo topla tropska morja in vetrovi raznašajo vodno paro po Zemlji, s kondenzacijo pa potem nastajajo oblaki in padavine. Posebno izraziti tropski vremenski pojavi, hurikani ali tajfuni, so povezani z močnim izhlapevanjem iz tropskih morij in posledično kondenzacijo velikih količin vode, intenzivnimi padavinami in viharnimi vetrovi. Ti vrtninci se lahko učinkovito razvijejo le nad toplimi morji, hkrati pa se morajo premikati, kajti le tedaj prihajajo vedno nad novo izhlapevajočo toplo vodo. Pod mirujočim hurikanom bi se voda ohladila zaradi oblačnosti, ki odbije sončno sevanje, in zaradi hladnih padavin, ki iz oblakov padejo v morje. Čim hurikan pride nad kopno, oslabi, saj mu zmanjka dovoda vlage in latentne toplote.

Na območjih, kjer se mešajo različno topli morski tokovi, pogosto nastajajo vremenske fronte in cikloni zmernih geografskih širin. Eno takšnih območij je severni Atlantik med Labradorjem in Islandijo, kjer se stikata in mešata topli Zalivski in hladni Labradorski tok. Ob frontah in v ciklonih se pojavljajo padavine in močni vetrovi, ki poganjajo valove. Na teh morskobmočjih se pogosto pojavljajo debele meglene plasti, ki ovirajo plovbo.

Adveksijski prenos energije se kažejo z oceanskimi tokovi. Ti so večinoma horizontalni in ko morská voda počasi potuje, se ob tem ohlaja ali segreva. Spreminja se ji tudi slanost. Oboje vpliva na gostoto in zato morskí tokovi spreminjajo svojo globino. Pogosto so površinski tokovi drugačni od tokov v globinah. Gladina oceanov ostaja ves čas skoraj enaka, razlike dosežejo največ nekaj centimetrov na 1000 km. Morski tokovi tečejo v ravnotežju sil: usklajene so sile gradienta pritiska in Corioliosova sila ter sila zaradi upora vetra ob gladino. Sila gradienta pritiska je posledica razlik v gostoti in višini gladine morja. Na pretakanje vode vplivajo oblike celin in izoblikovanost morskéga dna, saj se mora ob ovirah tok prilagoditi. Tako v svetovnih oceanih ni planetarnega kroženja, ki bi bilo podobno tistemu v ozračju, ampak so morskí tokovi zaključeni v termohalidni cirkulaciji, ki ima pentlje v vseh oceanih. V polzaprtih in zaprtih morjih z razgibanim dnóm, kot sta Sredozemsko in Jadransko morje (Gačić, Poulain, Zore-Armada, Barale 2001; Malačič in Petelin 2001), so tokovi še bistveno bolj zapleteni in nanje vplivajo še drugi fizikalni dejavniki.

Na polarnih oceanih plavajo ledene plasti. Okoli severnega pola je na površju oceana le zamrznjeno morje, na Antarktiki pa so kilometrske ledene plasti naslonjene na otoke in celino, okoli celine pa led plava na morju. Led sestavlja skoraj povsem sladka voda. Plavajoči led je v temperaturnem ravnovesju z oceansko vodo, hkrati pa izmenjuje energijo tudi z ozračjem. Polarni led se tali zaradi energije, ki pride od Sonca, iz ozračja in iz morja. Pri zmrzovanju morske vode pri temperaturah pod 0°C se izloči sol, tako da je preostala voda bolj slana. Od plavajočéga ledu se občasno in naključno lomijo ledene gore, ki jih morskí tokovi odnesejo v zmerne geografske širine, kjer se hitreje talijo. Za taljenje je potrebna talilna toplota, zato se okoli ledu morje ohlaja in s tem se zmanjšuje njegova slanost.



Slika 3: Pretakanje snovi in energije v ozračju in oceanih v poldnevniški smeri.

3 Kako klimatske spremembe vplivajo na oceane

Klimatske spremembe, ki smo jim priča in ki jih je pričakovati v prihodnjih desetletjih in stoletjih, so posledica sprememb v energijski bilanci površja celin in oceanov ter ozračja nad njimi. Z večanjem koncentracije toplogrednih plinov se zmanjšuje sevalno ohlajanje površja in ozračja, s tem se povečuje temperatura. Dosedanje spremembe dolgoletne povprečne temperature so v 20. stoletju dosegle $0,6^{\circ}\text{C}$ (severna polobla 1°C), pričakovane spremembe v naslednjem stoletju pa bi lahko bile v intervalu od $1,4$ do $5,8^{\circ}\text{C}$ (IPCC 2001). Sprememba temperature zraka bo torej v 21. stoletju bistveno večja kot v 20. stoletju. Če se bo približala zgornji meji, bo tolikšna, kot je ni bilo v zadnjih 10.000 letih.

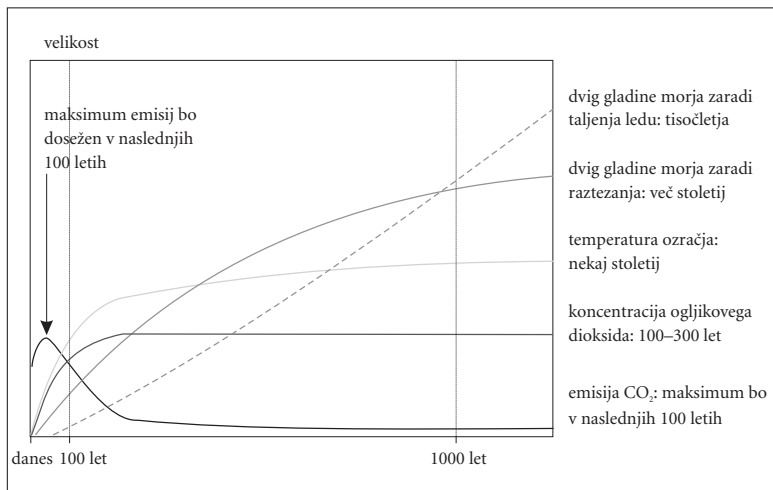
Sprememba temperature zraka ni edina sprememba, ki jo je pričakovati, saj so dogajanja v ozračju in oceanih med seboj večkratno povratno povezana. Skupine klimatologov, meteorologov in oceanografov se že celo desetletje ukvarjajo s temi vprašanji in za nekatera vprašanja se odgovori jasni, za druge pa še ne.

Preglednica 1: Zaznane okoljske spremembe (IPCC 2001).

dogajanje	velikost spremembe
koncentracija CO_2 v ozračju	od 280 ppm leta 1750 do 368 ppm leta 2000 (+31 % \pm 5 %)
koncentracija CH_4	od 700 ppb leta 1750 do 2000 ppb leta 2000 (+150 % \pm 25 %)
koncentracija N_2O	od 270 ppb leta 1750 na 316 ppb leta 2000 (+17 % \pm 5 %)
srednja temperatura Zemlje	+ $0,6^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$, večji porast na kopnem
srednja temperature severne poloble	+ 1°C , največ od tega v zadnjem desetletju 20. stoletja
dnevne razlike temperature	se zmanjšujejo, najnižje temperature naraščajo dvakrat hitreje od najvišjih
količina padavin	v poprečju narasla od 5 do 10 %, regionalno zmanjšanje (Sredozemlje, severna Afrika)
dogodki z močnimi padavinami	naraščanje v zmernih in visokih geografskih širinah severne poloble
pogostost in resnost suš	povečano v poletnem času
morska gladina	v 20. stoletju opazovan dvig od 10 do 20 cm
razsežnost arktičnega plavajočega ledu	40 % zmanjšanje poletne debeline, od 10 do 15 % zmanjšan obseg med letoma 1950 in 2000
ledeniki zunaj polarnega kroga	splošno in pospešeno umikanje
obseg snežne odeje	zmanjšanje za 10 % od leta 1960 dalje
permafrost	odmrzovanje v polarnih in ostalih krajih
El Niño	pogostejši pojav, daljše trajanje
vegetacijsko obdobje	podaljševanje za 1 do 4 dni na desetletje

Preglednica 2: Spremembe povprečne temperature ozračja in tal v $^{\circ}\text{C}$ za celotno Zemljo ob spremembah emisivnosti ozračja pri albedu 0,5; debelo je zapisano sedanje stanje (Vrhovec 2001), povprečna temperatura ozračja velja za vso troposfero do višine 12 km.

emisivnost	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	1,00
temperatura ozračja	-35	-33	-31	-29	-26	-15
temperatura tal	8	11	14	16	19	32



Slika 4: Predvidene spremembe v naslednjih stoletjih (<http://www.ipcc.ch/present/graphics.htm>).

Naraščanje povprečne temperature Zemlje je mogoče izračunati iz energetske bilance. Koncentracije toplogrednih plinov določajo emisivnost ozračja. Spremembe koncentracij toplogrednih plinov in temperatur opisujejo predvideni scenariji, ki skušajo napovedovati ekonomski in populacijski razvoj v naslednjem stoletju.

Zadnji stolpec preglednice 2 je namenjen le ilustraciji tega, kaj bi se zgodilo s temperaturo na Zemlji, če bi ozračje povsem absorbiralo celotno IR sevanje, s katerim se površje Zemlje ohlaja. V tem primeru bi bila povprečna temperatura tal kar 32° C, v primerjavi s sedanjimi 14° C.

4 Povečana temperatura zraka in oceanov in hidrološki cikli na Zemlji

- Zaradi povečane temperature morja se poveča izhlapevanje, zaradi večje količine vlage v zraku se poveča oblačnost in zato se zveča albedo Zemlje. Albedo pove, koliko sončnega sevanja odbije Zemlja. Ker pride do tal manj sončnega sevanja se temperaturi tal in ozračja površja znižata. Na albedo Zemlje ne vplivajo le oblaki, pač pa tudi droben lebdeč prah ali aerosol, ki v ozračje prihaja iz naravnih (vulkani, puščave, morja, vegetacija) in antropogenih virov (industrija, kmetijstvo, promet). Povečanje koncentracije aerosola povečuje albedo Zemlje. Učinek je enak kot pri povečani oblačnosti.

Preglednica 3: Spremembe temperature ozračja in tal v °C ob spremembah albeda, pri sedanji emisivnosti 0.7; debelo je zapisano sedanje stanje (Vrhovec 2001), povprečna temperatura ozračja velja za vso troposfero do višine 12 km.

albedo	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
temperatura ozračja	-22	-27	-31	-35	-40	-48
temperatura tal	24	18	14	8	-2	-4

- Povečana količina vodne pare povzroči večjo količino oblačnosti pa tudi več padavin. Do padavin pride tam, kjer so temperature dovolj nizke, da pride do kondenzacije. Zato je pričakovati več padavin

v subpolarnih in polarnih krajih. Prav tako je v zmernih geografskih širinah pričakovati več padavin v hladnejšem delu leta in manj v toplejšem delu leta. V polarnih krajih pade več snega, tako da se povečuje debelina ledenega pokrova na Antarktiki in Grenlandiji. S tem je del vode izločen iz nadaljnega kroženja.

3. Zaradi povečanih temperatur prihaja do povečanega izhlapevanja iz kopnega in morja, seveda predvsem v toplejšem delu leta. Zato je pričakovati pogostejše poletne suše.
4. Zaradi večje količine vlage v zraku je na voljo več latentne toplote, ki se sprosti ob kondenzaciji. Zato je pričakovati večjo intenzivnost vremenskih pojavov, torej močnejše nalive in viharje.
5. Zaradi višjih povprečnih temperatur se dviguje nadmorska višina izoterme 0°C (ledišča) v ozračju, v 20. stoletju za približno 200 metrov. Zato se talijo gorski ledeniki, dviguje se spodnja meja ledenikov, zaradi toplih poletij se zmanjšuje masa ledu. Staljena voda po rekah odteče v morja.
6. Povečana temperatura morske vode v tropih omogoča nastanek številnejših tajfunov.
7. Povečana temperatura morske vode v tropskem delu Tihega oceana omogoči izrazitejši pojav El Niña (Vrhovec 1998), saj je temperaturna razlika med globinsko in površinsko vodo v oceanu večja, kot je bila v preteklosti.
8. Povečano izhlapevanje poveča slanost tropske morske vode, tako da lažje tone v globino.
9. Plavajoči led na Arktiki in okoli Antarktike se zaradi višjih temperatur morske vode ob svojem robu tali (Bigg 2003). Obseg in debelina plavajočega ledu se zato zmanjšuje.

5 Dvigovanje gladine morja

V geološki zgodovini se je gladina morja močno spreminjala, dostikrat tudi v povezavi s klimatskimi spremembami (Rakovec 2002). V 20. stoletju se je povprečna višina svetovnih oceanov dvignila od 10 do 20 cm. V prejšnjih stoletjih se je gladina morja spreminjala le za nekaj centimetrov (IPCC 2001; Robič, Vrhovec 2002). Spreminjanje višine gladine morja je odvisna od prostornine morske vode in od morebitnega pogreznanja obal. Premiki obalnih predelov kopnega so omejeni na geološko nestabilna območja, kjer prihaja do posedanja nedavno odloženih usedlin (rečne delte) in na območja tektonskih premikov. Deli celin se dvigajo zaradi relaksacije kamnin po umiku kontinentalnih ledenikov ob koncu ledene dobe (na primer Skandinavija, Severna Amerika) ali posedajo zaradi izčrpanja podtalnice.

Prostornina vode v oceanih narašča zaradi dveh vzrokov: na eni strani se povečuje količina vode v oceanih zaradi taljenja ledu na kopnem, na drugi strani pa se morska voda segreva, s tem se ji zmanjšuje gostota in večja prostornina. Razpenjanje morske vode je sicer majhno, vendar je treba upoštevati, da se segrevajo debele plasti morja. Če se morje globoko 200 m segreje za 1 stopinjo, se gladina morja dvigne za 2,6 cm. Če je za 1 stopinjo segreta plast vode debela 1 km se gladina dvigne že za 13 cm. Bistvene temperaturne spremembe se dogajajo le v premešani morski vodi nad termoklino, tako da se globokomorska voda še ni segrela in razpela. Ker je morje najboljše premešano v subpolarnih krajih, kjer se voda spušča vse do dna oceanov, so posebno pomembne temperaturne razmere v teh krajih. Če bi se vsa morja na Zemlji enakomerno segrela le za 3 stopinje, bi se gladina dvignila kar za 240 cm.

K dviganju gladine morja prispeva še voda talečih se gorskih ledenikov zmernih in tropskih geografskih širin ter taljenje ledu in lomljenje ledenih gor na robovih Grenlandije. Taljenje ledu je prispevalo okoli 40 % dviga morske gladine v 20. stoletju. Taljenje plavajočega ledu ne spreminja prostornine morske vode, ker je plavajoči led že sam izpodrival morsko vodo. Plavajoči led se predvsem tali na meji med ledom in morjem in manj na meji med ledom in zrakom. Dvig gladine morja zmanjšuje odlaganje snega na Antarktiki, saj je tamkajšnji led za nekaj stoletij izločen iz hidrološkega cikla. K dviganju gladine morja prispevajo tudi nekateri človekovi vplivi.

V 21. stoletju je pričakovati dvig gladine morja v intervalu med 9 in 94 cm (IPCC 2001), odvisno od predvidenih scenarijev emisij toplogrednih plinov. K dvigu gladine bodo najpomembneje prispe-



Slika 5: Razlogi za spreminjanje gladine morja (<http://www.ipcc.ch/present/graphics.htm>).

vali: razpenjanje morske vode, taljenje ledu na robu Grenlandije in v manjši meri taljenje gorskih ledenikov. Če bi se stalil ves led, ki je na Grenlandiji tudi na kopnem, potem bi se gladina morja dvignila za 740 cm. Takšna sprememba bi bila možna v 1000 do 5000 letih. Obsežno taljenje kopnega ledu na Antarktiki pri predvidenih spremembah klime ni možno, so pa možne spremembe v obsegu stalnega plavajočega ledu okoli te celine.

Že dvig gladine morja za 50 cm bo povzročil precejšnje težave na atolih v tropskih morjih. Prihajalo bo do zasoljevanja obalnih močvirij, do prodiranja morske vode v nizkih delтах velikih rek (Nil, Ganges, Mekong), do pronicanja morske vode v celinsko podtalnico in do občasnega poplavljanja morja ob drugih nizkih obalah. Ob močnih vetrovih bodo valovi ob peščenih obalah lahko segali globlje na kopno. Za prebivalstvo tropskih atolov in nizkih obal celin bodo dodatno nevarnost predstavljali valovi ob tajfunih, saj se tedaj gladina morja lokalno še dodatno dvigne zaradi nizkega zračnega pritiska in stekanja. Ob tajfunih je posebej pomembno povečanje valovne erozije na nizkih obalah.

Za večino ledenih gmot na kopnem Antarktike in na otokih Arktike ni pričakovati, da bi se zaradi pričakovanih klimatskih sprememb v naslednjih stoletjih pričele taliti. Četudi se bo povprečna temperatura zraka dvignila za nekaj stopinj, bodo povprečne temperature antarktičnega ledu še vedno ostale nekaj deset stopinj pod lediščem.

6 Klimatske spremembe in oceanski tokovi

Oceani bistveno vplivajo na klimatske razmere na Zemlji. Če se ozračje razmeroma hitro odzove na spremembe v energijskih tokovih, se oceani na spremembe odzivajo dosti počasneje. Že plitva obalna morja blažijo temperaturne ekstreme, globoki oceani s svojimi površinskimi in globinskimi tokovi pa se odzivajo na energijske spremembe le počasi. Posebej počasi se segrevajo in ohlajajo globinske oceanske vode, ki povprečno pridejo na površje morja le enkrat na vsakih nekaj stoletij. Stalni morski tokovi, na primer severnoatlantski Zalivski tok, bistveno prispevajo k oblikovanju podnebja celin. Tudi drugi površinski morski tokovi, ki prenašajo vodo v meridionalni smeri (Labradorski tok, Humboltov in Namibijski tok), bistveno spreminjajo energijsko bilanco in podnebje obalnih območij. Morski tokovi se gibljejo v ravnotežju sil. To so: gradientna sila zaradi razlik v pritisku, ki je posledica razlik v višini gladine morja ter razlik temperature in slanosti morske vode, Coriolisove sile zaradi vrtenja Zemlje in sile vetra, ki s trenjem poganja površinsko plast morja.

Pri obravnavi klimatskih sprememb je pomembno ugotoviti, ali bodo predvidene spremembe temperatur, razporeditve morskega ledu in padavin vplivale na spremembe oceanskih tokov. Na spremembe

v ozračju se hitreje odziva premešana morska voda nad termoklino. Morska območja z globoko termoklino, predvsem severni Atlantik, so torej tista, kjer je občutljivost oceanov na spremembe klime največja. Površinski morski tokovi se razmeroma hitro odzovejo na spremembe vetrovnih razmer, tokovi globlje v oceanih pa počasneje.

Predvideni dvig gladine morja bo vplival na morske tokove, če se bo morje segrevalo po Zemlji neenakomerno in bo zato razpenjanje v posameznih delih različno. Zaradi sprememb sile gradienta pritiska se bodo tokovi spremenili, svoje bo prispevala tudi sprememba slanosti zaradi taljenja subpolarnega plavajočega ledu. Na robovih polarnih območjih se led tali pri temperaturah nad 0° C, s tem se vršnemu delu morske vode zmanjša slanost in njena stabilnost tam naraste. Zaradi močnega mešanja vode v severnem Atlantiku, se je tu v 20. stoletju ogrelo največ morske vode. Gladina se je tu dvignila za približno 18 cm, drugod na Atlantiku za 10 cm (Harvey 2000). Dvig gladine v severnem Atlantiku deluje zaviralno na Zalivski tok, saj mora zaradi višje gladine sedaj ta tok teči »navkreber«. Če bi temperatura oceana v severnem Atlantiku še narasla, bi se Zalivski tok lahko v naslednjih desetletjih povsem ustavil in zahodna Evropa bi se potem močno ohladila. Njeno milo podnebje sedaj vzdržuje prav Zalivski tok, ki prenaša velike količine toplote iz toplega subtropskega Atlantika proti severu. Ohladitev Evrope zaradi zamrtja Zalivskega toka bi bila manjša, kot je predvideno ogrevanje zaradi povečanega učinka tople grede v 21. stoletju. Pojemanje intenzitete toka bi zmanjšalo mešanje in tonjenje oceanske vode v severnem Atlantiku, hkrati se bi povečale temperaturne razlike, s tem razlike v gostoti in spet se bi povečala gradientna sila pritiska. Tako je pričakovati, da se bo severnoatlantski tok v prihodnjih desetletjih spreminjal. Obdobjem slabitve bodo sledila obdobja ojačitve, kar bo bistveno vplivalo na vremenske in klimatske razmere na celinah ob severnem Atlantiku.

Za ozračje je zelo verjetno, da se bodo temperature najbolj povečale v subpolarnih krajih, manj pa v tropskih in polarnih. Tako se bo zmanjšal temperaturni gradient, s tem tudi prenos toplote, pa tudi intenziteta vetrov. Ker se bo zmanjšal ta sistematični zunanji vpliv, bodo pri vremenskem dogajanju dobili še večjo vlogo stohastični, kaotični dejavniki, tako da se bo povečala občutljivost vremenskih in tokovnih vzorcev na majhne spremembe zunanjih vplivov. Zaradi klimatskih sprememb bosta vreme in tokovanje postala manj predvidljiva in pričakovati je večje število nenavadnih dogodkov, ki se v povezavi s človekovo dejavnostjo kažejo kot izjemni dogodki, pogosto kot prave naravne katastrofe. Med takšne nenavadne dogodke spada tudi na primer oslabitev in sprememba smeri tokovanja v severnem Jadranu poleti 2003.

7 Viri in literatura

- Bigg, G. 2003: The oceans and climate, second edition. Cambridge.
- Gačić, M., Poulain, P.-M., Zore-Armada, M., Barale, V. 2001: Overview, Physical oceanography of the Adriatic sea. Dordrecht.
- Harvey, D. L. D. 2000: Climate and global change. Essex.
- IPCC 2001: Climate change 2001: Synthesis report. A contribution of working groups I; II and III. Cambridge.
- Malačič, V., Petelin, B. 2001: Regional studies, Gulf of Trieste, Physical oceanography of the Adriatic sea. Dordrecht.
- Rakovec, J. 2002: Podnebje na Zemlji v geoloških dobah. Proteus 65-4. Ljubljana.
- Rakovec, J., Vrhovec, T. 2000: Osnove meteorologije za naravoslovce in tehnike. Matematika–Fizika 39. Ljubljana.
- Robič, M., Vrhovec, T. 2002: Poplavljanje morske obale. Nesreče in varstvo pred njimi. Ljubljana.
- Vrhovec, T. 2001: Učinek tople grede in mile zime. Proteus 63-7. Ljubljana.
- Vrhovec, T. 1998: El Nino, oceani, klimatske spremembe in vreme. Ujma 12. Ljubljana.

8 Summary: The oceans and the climate change

(translated by the author)

The seas and oceans play a major role in the energy balance of the planet Earth. The processes in oceans are operating on a much longer time scale than those in the atmosphere. The spatial scales of oceanic processes are ranging from a small scale turbulence up to the thermo-haline circulation influencing all oceans on the Earth. The energy balance of oceans is different from the energy balance of continents. The radiative forcing (long- and short-wave) is the same for the continents and for the oceans but the oceans have a much lower albedo and a greater thermal capacity than the surface of continents. Additionally the solar radiation is absorbed in a thick surface layer of sea, so much more water is heated and the diurnal and seasonal variations are smaller there than in the continental ground. What is the most important is the mixing of sea water that enables interaction of great quantities of water with atmosphere. At the sea – atmosphere interface additional energy fluxes are present in a form of the latent heat and the sensible heat flux. Especially the latent heat transfer due to evaporation is a very efficient way of cooling the sea surface. The vertical stability and the pressure gradient force in oceans depend upon the distribution of salinity and temperature. They enable or inhibit vertical mixing and together with the surface winds and the topography of the sea surface they cause the oceanic currents. They are transporting great amounts of the sensible heat in horizontal direction and they contribute to the poleward transport of energy from the equatorial regions. The polar oceans are covered by floating ice. It consists of fresh water, it increases albedo of these oceans and it increases the salinity of the surface sea water. The icebergs are calving from ice shelves, the oceanic currents transport them out of polar regions and they melt into more moderate oceans.

Some consequences of increased green house effect are presented and their development in the 21st century is discussed. The influence of these climate changes upon the hydrological cycle and oceans are described taking into account known direct and indirect feedbacks. The sea level rise is explained as a consequence of thermal expansion and of melting of the continental ice and glacier in the tropics and in the moderate climate outside the polar regions. The accumulation of snow in Antarctica is mentioned as one of the reasons for reducing the sea level rise. The oceanic currents will change with the increase of temperature. A special concern is related to the North Atlantic drift, where increased temperatures can contribute to the increased melting of floating ice. Its fresh water could stabilize the ocean water column in the North Atlantic, reducing vertical mixing there. This could reduce the intensity of the thermo-haline circulation in the Atlantic and the North Atlantic drift could decrease in intensity. This would significantly reduce the temperatures in the western Europe and again increase the floating ice extend in the North Atlantic. These changes and oscillations could be rapid in the time frame of some decades. With the decrease of the temperature gradient between the polar and tropic regions due to the increased green house effect the external forcing on the atmosphere-ocean system will decrease and the internal – inherently chaotic – forcing will gain in importance.

