

Od kocke ledu v kozarcu vode do dviga morske gladine zaradi taljenja ledenikov

Vlado Malačič

Prispevek obravnava problem globalne rasti morske gladine zaradi taljenja ledenikov. S primerom ledu v kozarcu vode je prikazano bistvo problema taljenja ledenikov in globalne rasti oceanov. Prispevek razloži, da ledene plavajoče gmote v Arktičnem oceanu oziroma Severnem ledenem morju ne prispevajo k rasti gladine oceanov in da je za to potrebno taljenje ledenikov, ki so ustvarjeni na celinah, kot je na primer Antarktika.

Uvod

Kaj najpogosteje slišimo, da je vzrok za globalno rast morske gladine? Zagotovo je to globalna rast temperature ozračja in s tem tudi oceanov, ki pa se kaže v dvigu gladine zaradi raztezanja prostornine vode na planetu. Ob tem bi tudi večina imela v mislih taljenje ledenikov in polarnih kap. Vendar prispeva k rasti gladine zgolj eno polarno območje.

Še vedno potekajo razprave o deležu človekovega vpliva na globalno segrevanje. V zvezi z rastjo morske gladine in segrevanja planeta je Medvladna skupina za preučevanje podnebnih sprememb (IPCC) (IPCC, Climate Change 2007) ugotovila rast mor-

ske gladine v zadnjih desetletjih na podlagi meritev vodostaja v obalnih postajah (s tako imenovanimi mareografi, merilci višine morske vode) v obdobju od leta 1961 do 2003 in s satelitskimi opazovanji oceanov v letih od 1993 do 2003.

Kot je razbrati iz tabele 1, je v obdobju približno štirideset let gladina naraščala s hitrostjo $1,8 \pm 0,5$ milimetra na leto, pri čemer je napoved rasti, ki je sestavljena kot vsota posameznih prispevkov meritev, bila nižja za več kot eno tretjino (39 odstotkov), in sicer za $0,7 \pm 0,7$ milimetra na leto, saj se je gladina dvigala s količnikom $1,8$ milimetra na leto. Napaka pri razliki med opazovano in predvideno rastjo gladine ni enaka

Tabela 1. Povzeto po IPCC, Climate Change 2007.

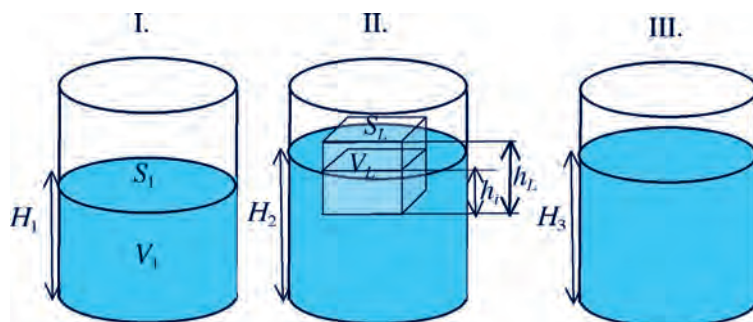
Izvor rasti	Hitrost rasti gladine (milimetrov na leto)	
	1961-2003	1993-2003
Termično raztezanje	$0,42 \pm 0,12$	$1,6 \pm 0,5$
Taljenje ledenikov in polarnih kap	$0,50 \pm 0,18$	$0,77 \pm 0,22$
Taljenje Grenlandije	$0,5 \pm 1,2$	$2,1 \pm 0,7$
Taljenje Antarktike	$1,4 \pm 4,1$	$2,1 \pm 3,5$
Vsota predvidenih prispevkov	$1,1 \pm 0,5$	$2,8 \pm 0,7$
Opazovana rast	$1,8 \pm 0,5$	$3,1 \pm 0,7$
Razlika (opazovana – predvidena vsota rasti)	$0,7 \pm 0,7$	$0,3 \pm 1,0$

vsoti napak posameznih členov, ampak je manjša. Nezanesljivost je kljub vsemu precejšnja, še posebej pri oceni posameznih, zelo vplivnih prispevkov. Največja je relativna nezanesljivost ocene rasti gladine zaradi taljenja Grenlandije in Antarktike ($1,2/0,5 = 240$ odstotkov oziroma $4,1/1,4 = 293$ odstotkov). Bistvo tabele 1 pa je v dejstvu, da je bila povprečna opazovana rast enaka 1,8 milimetra na leto.

Medvladna skupina za preučevanje podnebnih sprememb (IPCC) je sprejela stališče, da naj bi se globalna površinska temperatura ozračja v 21. stoletju dvignila med spodnjo mejo 1,8 stopinje Celzija in zgornjo mejo 4,0 stopinj Celzija, pri čemer je verjetni interval spodnje meje med 1,1 in 2,9 stopinje Celzija, verjetni interval za zgornjo mejo pa je med 2,4 stopinje Celzija in 6,4 stopinje Celzija, pri čemer »verjetni« pomeni več kot 66-odstotno verjetnost. Interval napovedi rasti in variabilnost njegovih mej sta odvisna od različnih scenarijev izpustov toplogrednih plinov. Tu se skriva podlaga za ugotovitev, da naj bi se v tem stoletju z veliko verjetnostjo (več kot 90-odstotno) gladina morij in oceanov zvišala v intervalu od 0,2 metra do 0,6 metra. Vendar pa je treba biti pri razlogih za ta dvig previden, saj na primer procesi, ki potekajo v polarnih ledenikih, niso dovolj znani (rečni tokovi znotraj ledenih gmot). Rast gladine je lahko hitrejša od zapisane.

Kocka ledu v kozarcu vode

Privzemimo tri stanja vode v valjastem kozarcu. Naj je sprva v kozarcu le voda s prostornino V_1 in površino S_1 (stanje I). Naj



je ta voda ohlajena, pa naj bo zaradi enostavnosti ta voda celo napravljena tako, da se je v njej predhodno raztopil en kos ledu in je bila zatem vzdrževana pri temperaturi 0 stopinj Celzija. Skratka, taka voda ima gostoto (ρ_V) 0,999 kilograma na kubični meter pri temperaturi 0 stopinj Celzija.

V to vodo sedaj namestimo kvader ledu s prostornino V_L in površino S_L , kar označimo kot stanje II. Vemo, da ima led manjšo gostoto od vode ($\rho_L = 0,917$ kilograma na kubični meter), da bo torej plaval na gladini vode. Po Arhimedovem zakonu velja, da je sila vzgona enaka teži izpodrinjene vode $m_{iv}g$. Prostornina mase izpodrinjene vode m_{iv} ocenimo s potopljenim delom kocke ledu kot $h_i S_L$, medtem ko je prostornina kocke ledu enaka $h_L S_L$. Ker led plava na gladini, je sila vzgona na led F_V enaka teži ledu F_g , iz česar dobimo izraz za višino potopljenega dela ledu:

$$m_{iv}g = m_L g \Rightarrow h_i S_L \rho_V = h_L S_L \rho_L \Rightarrow$$

$$h_i = \frac{h_L \rho_L}{\rho_V}, \quad (1)$$

kar naj bi bilo zagotovo znano iz srednje šole. Ker je $\rho_L/\rho_V = 0,92$, je seveda več kot 9/10 ledu potopljenega, slika s plavajočim ledom pa tega zaradi nazornosti ne poudari.



Deli ledenih plošč, ki pokrivajo Antarktiko, se zaradi podnebnih sprememb topijo hitreje, kot so predvidevali.

Vir: <http://priceofoil.org/2008/01/14/loss-of-antarctic-ice-increased-75-in-10-years/>.

Do sedaj smo se ukvarjali z ravnovesjem sil na plavajočo kocko ledu. Vendar je prostornina vode tik po vstavitvi ledu vanjo enaka njeni prostornini pred vnosom ledu, saj vode nismo dolivali niti je odvezemali. Ker pa je del ledu potopljen, je ravno za ta potopljeni del prostornine ledu izpodrinjena okolna voda v kozarcu. Voda zato v stanju II seže višje, skratka $H_2 > H_1$. Kolika pa je višina H_2 ?

Zapišimo ohranitev prostornine vode med stanjema I in II. Prostornina vode v stanju II izrazimo kot vsoto prostornine spodnjega dela vode do višine brez ledu ($H_2 - H_1$), kateremu dodamo prostornino vode okoli ledu, ki pa ima osnovno površino ($S_1 - S_L$):

$$S_1(H_2 - h_i) + (S_1 - S_L)h_i = S_1H_1 \Rightarrow$$

$$H_2 = h_i \frac{S_L}{S_1} + H_1.$$

(2)

Sedaj končno preidimo k stanju III, v katerem je ves led raztopljen. Privzemimo, da se temperatura ni spremenila, pa četudi bi se,

ne bi bistveno vplivala na izid. Ohranja se *masa v kozarcu*: masa vode in ledu v stanju III je enaka masi v stanju II:

$$\rho_V V_3 = \rho_V V_1 + \rho_L V_L,$$

pri čemer smo upoštevali, da je masa vode in stanju II enaka masi v stanju I, to je $\rho_V V_1$. Prostornine izrazimo z višinami in površinami osnovnih ploskev:

$$\rho_V S_1 H_3 = \rho_V S_1 H_1 + \rho_L S_L h_L.$$

(3)

Višino ledu h_L izrazimo iz (1) s pomočjo višine potopljenega dela $h_L = h_i \rho_V / \rho_L$ in zgornjo enačbo delimo s $S_1 \rho_V$:

$$H_3 = H_1 + h_i \frac{S_L}{S_1}.$$

(4)



Višje zunanje temperature na Antarktiki lahko razlomijo ledeno polico in jo počasi popolnoma uničijo. Znanstveniki so s pomočjo satelitskih posnetkov vode, ki nastaja na površju ledu kot posledica njegovega taljenja, in računalniške simulacije gibanj in sil znotraj ledene police nazorno razložili, da dodatni pritisk vode na površju, ki je posledica taljenja ledu in ki polni razpoke, lahko popolnoma razlomi led. Slika roba predela Larsen na Antarktiki, posneta iz satelita Landsat 7 21. februarja leta 2000, kaže jezera vode kot posledico taljenja ledu in ledene gore, ki so se ločile od Larsena.

Vir: <http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=1102>. Image courtesy Landsat 7 Science Team and NASA GSFC.

Torej je po (2) in (4) višina H_3 enaka višini H_2 . Višina vode v kozarcu z ledom je enaka višini vode potem, ko se led v njej stali. Taljenje ledu v vodi ne vpliva na njeno višino prav nič. Do tega zaključka smo prišli z uporabo izraza za silo vzgona, ravnovesja med silo vzgona in teže plavajočega ledu, izraza za ohranitev prostornine vode ob vstavitvi ledu v vodo in izraza za ohranitev mase vode in ledu med procesom taljenja ledu.

Razprava in sklepi

Zagotovo voda v kozarcu vode zavzema bistveno drugačno geometrijo, kot je geometrija oceanov na Zemlji. Morska voda je tudi slana, ima nekaj odstotkov višjo gostoto od vode brez soli, temperatura oceanov pa seveda ni blizu ničle. Vendar smo s preprostim primerom prišli do pomembne ugotovitve:

Taljenja vseh tistih ledenikov, ki se niso ustvarili na kopnem, ampak plavajo na vodi, ne bodo prispevala k rasti morske gladine.

Kateri pa so ledeniki, ki so na kopnem? Ali so ledene plavajoče gmote v Arktičnem oceanu takšne? Ne, te plavajo na morski vodi, jedrske podmornice že desetletja plujejo pod njimi. Njihovo taljenje torej ne

bo prispevalo k povišanju gladine. Kaj pa Antarktiki? Ta pa je na kopnem, tam je celina, le razmeroma tanek obrobni del ledu naj bi baje bil plavajoč. Na

medmrežju najdemo v spletni enciklopediji Wikipedia podatke, da je Antarktiki pet največja celina (Evropa in Avstralija sta manjši) s površino $A = 14,04 \cdot 10^6$ kvadratnih kilometrov, 98-odstotno je pokrita z ledom, ki ima povprečno debelino $h = 1,6$ kilometrov. Malo drugačni podatki so na <http://worldatlas.com/webimage/countrys/an.htm>, kjer najdemo površino $13,2 \cdot 10^6$ kvadratnih kilometrov in informacijo, da to pomeni 8,9 odstotka površine kopnega dela Zemlje. Iz teh podatkov ocenimo, kolika bi bila rast gladine, če bi se staljeni led Antarktike porazdelil po morski površini Zemlje.

Površina Zemlje je enaka $A_Z = 4 \pi r^2$, kjer za polmer Zemlje privzamemo $r = 6.367$ kilometrov. Iz podatka, da naj bi Antarktiki pomenila 8,9 odstotka kopnega dela Zemlje, izračunamo ta kopneni del kot $A_K = 148,3 \cdot 10^6$ kvadratnih kilometrov oziroma $157,3 \cdot 10^6$ kvadratnih kilometrov, če privzamemo za Antarktiko površino, ki jo omenja Wikipedia. Površino vodnega dela Zemlje dobimo kot $A_V = A_Z - A_K = 3,61 \cdot 10^8$ kvadratnih kilometrov ($3,52 \cdot 10^8$ kvadratnih kilometrov, vir Wikipedia) in ravno po tej



Raziskave so odkrile, da se bo še eno območje antarktične ledene plošče utegnilo v naslednjem stoletju hitro topiti.

Do sedaj se je zdelo, da je ledena polica Filchner-Ronne v Weddellskem morju varna pred neposrednim vplivom podnebnih sprememb. Polica je do neke mere zavarovana pred odprtim morjem, toda novejša raziskava napovedujejo, da jo utegnejo topli morski tokovi zelo kmalu ogroziti od spodaj.

Vir: <http://talkingmonkeynews.wordpress.com/2012/05/09/new-weakness-in-antarctic-ice-sheet-discovered/>.

površini bi se porazdelila staljena ledena gmota. Zato iz ohranitve volumna staljenega ledu izračunamo dodatno višino oceanov kot $(Ab_X)A_V$, kjer naj je b_X neznan višina staljenega ledu na Antarktiki. Če je b_X v povprečju enaka 10 metrov (česar ne vemo), potem bi se gladina oceanov dvignila za približno 0,4 metra z manj kot 8-odstotno napako zaradi napake v oceni površin. Razmerje višin je $10/0,4=25$, kar pa je blizu oceni 30, ki jo je ob obisku v Sloveniji maja leta 2007 podal profesor D. Pugh, predsednik Medvladne oceanografske komisije (IOC-UNESCO), in katera pomeni: 30 centimetrov staljenega ledu na Antarktiki pomeni dvig gladine oceanov za en centimeter.

Kaj pa Grenlandija, katero se tako pogosto omenja v časopisnih stolpcih? Samo ime pove, da bi naj nekoč to bila tudi zelena celina, pač odvisno od geološkega obdobja, v katerem jo opazujemo. Njena površina je $2,17 \cdot 10^6$ kvadratnih kilometrov, z ledom jo je pokritih 81 odstotkov (Wikipedia). Torej taljenje Grenlandije prispeva k rasti gladine, baje da za 7 metrov. Če bi se vsa Antarktika stalila, pa bi se gladina dvignila za 63 do 65 metrov, ta izračun lahko iz zapisanih podatkov naredite sami. Tudi taljenje ostalih ledenikov na kopnem prispeva k rasti gladine morij in oceanov, kot taljenje Antarktike,

razen tiste vode, ki izhlapi na poti od ledenika do morja.

Pa poskusimo oceniti tudi rast gladine zaradi termičnega raztezanja morij. To bo seveda najtežje, saj so površinske plasti morja v treh sezonskih obdobjih bolj ogrete od globinskih plasti, njih ogretost je sezonsko modularna, amplituda te modulacije pa raste od polov (2,3 stopinje Celzija) proti ekvatorju (5,6 stopinje Celzija) (Defant, 1961, tabela 45), raste pa tudi z globino. Podobno, vendar z manjšimi razlikami, velja zadnja ugotovitev tudi za srednje letne temperature, ki nas zanimajo. Poleg tega seveda velja, da se srednja letna temperatura spreminja z zemljepisno širino, najvišja je pri ekvatorju. Predaleč bi zašli, če bi hoteli upoštevati vpliv celinskih polc (topografije) na obrobju oceanov, ki prispevajo k višji temperaturi površinskih plasti, ter vpliv obsežnih podvodnih grebenov (gorstev) in horizontalnih nehomogenosti oceanov, ki se raztezajo tisoče kilometrov (El Niño) in so pomembno povezane z nekajletnimi spremembami sezonskih razmer v tropskem območju od Indonezije do Južne Amerike. Zagotovo bomo še kaj prezrli. Poleg tega je količnik toplotnega raztezanja morske vode odvisen ne le od temperature, pač pa tudi od slanosti morske vode, v globinah večjih od 100 me-



Nebeški zaliv (Paradise Bay) na Antarktiki.

Vir: <http://fyeab-icebergs.tumblr.com/post/4281705119/delorraineisthenewgreen-paradise-bay-antarctica>.

trov, pa tudi od pritiska, saj je tudi morska voda stisljiva. Poleg tega za morsko vodo ne velja, da se pod temperaturo 4 stopinj Celzija z nižanjem temperature proti 0 stopinjam Celzija njena gostota zmanjšuje. Tako ima v globinah okoli Antarktike ponekod vodna masa temperaturo, nižjo od 0 stopinj Celzija (Summerhayes in Thorpe, 1996), velik delež jo ima v teh globinah od 0 do 1 stopinje Celzija (severneje od Antarktike), še večji delež pa ima temperaturo od 1 do 2 stopinji Celzija (osrednji Tihi ocean in Atlantik) in le malo vodne mase je imelo temperaturo, večjo od 2,0 stopinj Celzija (ob izdaji Summerhayesove in Thorpove knjige leta 1996). Plast, ki je pod vplivom pridnene plasti ozračja (debeline približno 1 kilometer) v grobem seže do globin od 100 do 200 metrov, razen globokega tonjenja v ohlajenih območjih. Pri Summerhayesu in Thorpu (1996) najdemo porazdelitev temperatur oceanov v februarju, ki pada od 28,0 stopinj Celzija v ekvatorialnem delu predvsem Indijskega in tudi Tihega oceana do 0 stopinj Celzija blizu severne polarne kape in -1 stopinje Celzija okoli Antarktike. Zanimivo, da površinska temperatura v avgustu, pri čemer se v viru (Summerhayes in Thorpe, 1996) sklicujejo tudi na več kot 50 let starejši vir (Sverdrup, Johnson in Fleming, 1942) z dopolnitvami, ne odstopa od

prej navedene v februarju (Sverdrup, Johnson in Fleming, 1942).

Zato v grobem in počez privzemimo, da naj bi pri gladini površinska srednja temperatura oceanov bila 18 stopinj Celzija. V drugem viru (Defant, 1961, tabela 66, str. 142) najdemo oceno, da je delež površine oceanov, ki imajo temperaturo višjo od 20 stopinj Celzija, celo 53 odstotkov ali 191.10^6 kvadratnih kilometrov. Celo 35 odstotkov vodne površine ali 126.10^6 kvadratnih kilometrov pa ima temperaturo višjo od 25 stopinj Celzija. Upoštevajmo tudi navpično toplotno stratifikacijo v površinski plasti, debeli nekaj 100 metrov, v teh globinah je srednja letna temperatura od 10 do 15 stopinj Celzija (Kennish, 2001). Na podlagi zapisanega privzemimo, da je $A_V = 361.10^6$ kvadratnih kilometrov vodna površina, ki ima v srednjem temperaturo $T_0 = 15$ stopinj Celzija, pri čemer upoštevajmo razumno odstopanje ± 5 stopinj Celzija, in da je ta plast debela 200 metrov, pri čemer zanemarimo, da manj kot 8 odstotkov oceanov ne dosega teh globin (Defant, 1961). Slanost je količina brez enot, pomeni pa maso ionov soli v 1 kilogramu vode; slanost $S = 32$ na primer pomeni 32 gramov v 1 kilogramu morske vode ali 32 praktičnih enot slanosti (praktična enota slanosti, angl. Practical Salinity Unit, PSU, je definirana s pomočjo prevodnosti). Slanost se spreminja od približno 32 pri Beringovem prelivu in 34 pri Grenlandiji, pa tudi ob Antarktiki, do najvišje vrednosti več kot 37 v subtropskem pasu južnega Atlantika, pri brazilski



Akvamarinske barve antarktičnega ledu.

Vir: <http://www.awardweb.info/2012/02/antarctica-ice-in-photos/>.

obali. Za slanost površinskega sloja privzemimo vrednost 35 ± 1 . Na srečo navpične spremembe slanosti niso tako izrazite v površinski plasti oceana in zanjo privzamemo prej zapisano vrednost $S_0 = 35 \pm 1$, za tlak v srednji globini 100 metrov pa mirno $p_0 = 100$ decibarov.

(Sledечи izračun v okvirju lahko bralke in bralci, ki so manj veščji v matematiki, mirno preskočijo in v nadaljevanju besedila preberejo samo rezultate. Opomba uredništva.)

S pomočjo tabel (UNESCO, 1987) izračunamo količnik toplotnega raztezanja, ki pomeni relativni odvod gostote po temperaturi $\alpha(T_0, S_0, p_0) = \alpha_0 = 2,156 \cdot 10^{-4} / ^\circ\text{C}$. Povejmo, da se s spremembo tlaka za 100 decibarov α spremeni za kvečjemu 1 odstotek, kar je zanemarljivo pri grobi oceni, ki jo tu izvajamo, in zato pustimo p_0 nespremenjen. Naj še velja, da je

$$\alpha(10^\circ\text{C}, 34, 100 \text{ dbar}) = \alpha_{\min} = 1,666 \cdot 10^{-4} / ^\circ\text{C} \text{ ter } \alpha(20^\circ\text{C}, 36, 100 \text{ dbar}) = \alpha_{\max} = 2,596 \cdot 10^{-4} / ^\circ\text{C}.$$

Dodajmo, da α raste tako s slanostjo kot s temperaturo okoli (T_0, S_0, p_0) .

Naj velja, da se bo tudi temperatura morja površinske plasti oceanov v 21. stoletju dvignila od 1,8 stopinje Celzija do 4,0 stopinje Celzija, kar smo prej zapisali za napoved

globalnega dviga temperature zraka v nižjih plasteh ozračja. Predpostavimo, da se bo vsa sprememba prostornine vode zaradi toplotnega raztezanja odražala samo na njeni višini in da ne upoštevamo povečevanja površine z večanjem višine ter da se masa površinske plasti

oceanov ohranja. Tedaj je relativna sprememba prostornine $\Delta V/V = \Delta h/h = -\Delta\rho/\rho = \alpha\Delta T$. Pri $\Delta T_0 = 2,9^\circ\text{C}$ je $\alpha_0\Delta T_0 = 6,2524 \cdot 10^{-4}$ in od tod za $h=200$ metrov sledi $\Delta h_0 = 0,125$ metra. Pri $\Delta T_{\max} = 4,0^\circ\text{C}$ postane $\Delta h_{\max} = h_{\max}\alpha_{\max}\Delta T_{\max} = 0,208$ metra (okoli $T = 20^\circ\text{C}$, $S = 36$ in $p = 100$ dbar). Podobno postavimo oceno za $\Delta h_{\min} = 0,06$ metra pri $\Delta T_{\min} = 1,8^\circ\text{C}$ ($T = 10^\circ\text{C}$, $S = 34$ in $p = 100$ dbar).

Primerjajmo dobljene približke rasti gladine oceanov z oceno IPCC, da se naj bi v 21. stoletju gladina dvignila od 0,2 metra do 0,6 metra, in s preteklimi meritvami, ki kažejo, da je delež rasti gladine zaradi toplotnega raztezanja enak $0,4/1,8 = 22$ odstotkov, kar pomeni rast gladine zaradi toplotnega raztezanja v 21. stoletju od 0,04 metra do 0,13 metra, če bi seveda razmerja izvorov rasti v 21. stoletju ostala enaka tistim v drugi polovici 20. stoletja (tabela 1). Vidimo, da smo ob vseh grobih predpostavkah dobili še kar razumno oceno intervala rasti (0,06 metra – 0,2 metra), z »vmesno« vrednostjo $\Delta h_0 = 0,125$ metra. Seveda pa bi dobili vse ocene za polovico manjše, če bi za površinsko plast oceanov privzeli globino 100 metrov.

Na koncu se le povrnimo k taljenju ledenikov. Še vedno obstajajo številne raziskovalne

vsebine, vezane na podnebne spremembe zaradi sprememb na polarnih kapah in Grenlandiji (Bell, 2008). V njih tudi prikazujejo, da je taljenje ledenikov na celinah, kot sta Antarktika in Grenlandija, velika neznanka in da obstajajo ledeniške reke (bolje tokovi, angl. streams), ki sežejo v globino enega do dveh kilometrov, podobno kot okolna ledena plošča, široke pa so celo do 100 kilometrov in se raztezajo 800 kilometrov vzdolžno, proč od oceana. Pomikajo se s hitrostjo od 200 metrov do 1.000 metrov na leto, pri čemer za seboj puščajo razpoke oziroma brazde blizu stika z okolno ledeno ploščo. Razlikujejo tri vrste pospeševanja ledeniških potokov proti oceanu: 1.) Pospeševanje toka, ko ta na svojem dnu pride v stik z blatno podlago, staljeno vodo ali globokim jezerom, kar zmanjšuje trenje. 2.) Pri prelomu ledeniškega potoka na več gmot zaradi strižnega trenja kapljevine med njimi vse skupaj hitreje zdrsne proti oceanu - odmašeni ledeniški tok. 3.) Na poti ledenega toka proti oceanu ta v neki točki zapusti kopenski del in se pomika nad ledeno ploščo, ki plava nad oceanom, in jo je lahko stanjšal toplejši morski tok. Ta pojav je povezan s prej naštetim. Na Antarktiki so s pomočjo mikrovalovnih letalskih in satelitskih posnetkov zaznali več kot 160 globokih antarktičnih jezer, katerih prostornina naj bi bila 30 odstotkov vseh kopenskih jezer drugod na planetu. Opaziti je mogoče tudi veliko temnomodrih prog in lis, ki pomenijo površinsko staljeno vodo (jezera) na ledeniški plošči. Površinska jezera se praznijo skozi globoke ledeniške kotanje vse do kopenske plošče pod ledeno prevleko, debelo več kilometrov. Tako debela izolacijska plast ledu zadržuje geotermalno toploto, ki se sprošča iz celine pod ledeno ploščo, kot tudi toploto, ki se sprosti ob trenju med gibajočimi se plastmi ledu in snežnih skal. Ker meritve kažejo, da je gibanje ledeniških rek v zadnjem desetletju bolj intenzivno, zato se tudi zaradi trenja sprosti več toplote na njihovem dnu ob stiku s koptim ali drugimi ploščami. Sproščena toplota vpliva na tvor-

bo podpovršinskih jezer. Obstaja hidravlična povezanost med jezeri in ledenimi podpovršinskimi potoki, ki praznijo ena (podpovršinska) jezera in polnijo druga. Vsa ta kompleksnost taljenja ledenikov na ledenih celinah povečuje sum, da bodo razmerja vplivov posameznih izvorov rasti gladine (tabela 1) verjetno drugačna od tistih v preteklem stoletju. Vsekakor ni pričakovati, da bi se v tem stoletju gladina morij in oceanov povišala za en meter. Zdi se, da je to kar dobra (visoka) ocena za zgornjo mejo povišanja gladine v stoletju, v katerega smo vstopili. Vredno bi jo bilo upoštevati pri obalnih gradnjah, da objekti ne bi bili pogosto poplavljeni že čez kakšno stoletje. Bell (2008) tudi navaja poljudno razlago s taljenjem ledu v kozarcu vode, ki na srečo ni tako dosledna kot tukaj zapisana (tam seveda brez zapisanih matematičnih izrazov).

Literatura:

- IPCC, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 14. strani, IPCC Secretariat, Geneva, Switzerland, 2007.*
- UNESCO, 1987: *International Oceanographic tables. UNESCO Technical Papers in Marine Science, 4. Paris: UNESCO, 195 strani.*
- Summerhayes, C. P., Thorpe, S. A., 1996: *Oceanography. London: Manson Publishing Ltd, 352 strani.*
- Sverdrup, H. U., Johnson, M. W., Fleming, R. H., 1942: *The Oceans. Their Physics, Chemistry and General Biology. New York: Prentice-Hall, 1087 strani.*
- Defant, A., 1961: *Physical Oceanography, I. London: Pergamon Press, 729 str.*
- Kennish, M. J. (ur.), 2001: *Practical Handbook of Marine Science. 3rd Ed. New York: CRC Press. 876 strani.*
- Bell, R. E., 2008: *The Unquiet Ice. Scientific American, 298: 52-59.*

Opomba uredništva: Prispevek, ki zelo nazorno predstavlja vpliv taljenja ledenikov na dvig gladine oceanov, je po nerodnosti uredništva čakal na objavo nekoliko dlje časa, za kar se piscu iskreno opravičujemo in se mu posebej zahvaljujemo za uvidevnost. Tematiko bomo v naslednjih številkah skušali osvetliti še z najnovejšimi podatki.