

Šime Skočić, univ. bacc. ing. geod. et. geoinf., diplomski studij Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, e-mail: siskocic@geof.hr
 Tea Šimić, univ. bacc. ing. geod. et. geoinf., diplomski studij, Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, e-mail: tesimic@geof.hr
 Martin Tokić, univ. bacc. ing. geod. et. geoinf., diplomski studij, Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, e-mail: matokic@geof.hr
 Katarina Vardić, univ. bacc. ing. geod. et. geoinf., diplomski studij, Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, e-mail: kavardic@geof.hr

Primjena satelitskih misija u proučavanju kriosfere

SAŽETAK: U ovom radu opisane su metode i rezultati satelitskih promatranja koja proučavaju kriosferu. Izneseni su osnovni ciljevi takvih satelitskih mjerenja te su u skladu s njima napisani podaci o najbitnijim misijama takve vrste: CryoSat kao najznačajnijoj satelitskoj misiji, isključivo orijentiranoj proučavanju kriosfere te GRACE i GOCE gravitacijskim misijama koje se bave i određivanjem utjecaja promjena ledenih pokrova na Zemljino polje ubrzanja sile teže. Navedeni su i rezultati danih misija te konkretni primjeri upotrebe podataka. Rad se dotiče i utjecaja globalnih klimatskih promjena na kriosferu, kao i povezanost promjena kriosfere s varijacijama srednje razine mora. U zaključku se iznosi osvrt na obrađenu tematiku te predviđanja i mogućnosti daljnjeg napretka u proučavanju kriosfere.

Gljučne riječi: kriosfera, CryoSat, IceSat, GRACE, GOCE

Application of satellite missions in cryosphere studies

ABSTRACT: This paper gives an overview of the methods and results of satellite missions dedicated to cryosphere's investigation. Main aims of that kind of satellite missions are outlined and the corresponding information are thoroughly explained: CryoSat as the most significant satellite mission dedicated entirely to cryosphere research and GRACE and GOCE, gravity missions that, among other activities, determine the influence of the ice sheets on the Earth's gravity field. The results and practical implementation of these missions are also stated. The paper gives a framework of the influence of global climate changes on cryosphere and the connection of changes in cryosphere with variations of mean sea level. The conclusion gives a review of all mentioned topics with previsions and possibilities for further development in cryosphere studies.

Keywords: cryosphere, CryoSat, GRACE, GOCE

1. UVOD

Kriosfera, odnosno dijelovi površine Zemljina tijela gdje je voda kontinuirano reprezentirana svojim krutim stanjem, najmanje jedan dio godine, neprestano se smanjuje kao odgovor na fenomen globalnog zatopljenja. Neke od značajnijih i uočljivijih posljedica globalnog zatopljenja su: smanjenje broja ledenjaka, smanjenje površina trajnog leda i snijega te smanjenje površina ledenih kapa Zemlje (Fountain i dr., 2012). Kriosfera, zajedno sa svim svojim pojavnim oblicima, sadrži gotovo 80 % pitke vode na svijetu. Trajno zaleđene površine tla pokrivaju gotovo 25 % Zemljine površine. Snijeg, kao sezonska pojava, ima najveći postotak u kriosferi u svom maksimumu, pred kraj zime, i pokriva gotovo 50 % površine sjeverne polutke (Fitzharris, 1995).

Promjena razine mora najozbiljnija je posljedica globalnog zatopljenja ponajprije zbog činjenice da je većina ljudske populacije i infrastrukture svijeta smještena neposredno uz obale mora. Rezultati geoloških istraživanja navode da je razina mora za vrijeme dva interglacijalna perioda (Holstein i Eemian) bila za nekoliko metara viša nego danas (Hansen i dr., 2011). Promjene razine mora odvijaju se na dugoperiodičnim i kratkoperiodičnim vremenskim skalama. Promjene razine mora uzrokovane vjetrom, oceanskim strujama i silom plimnih valova primjer su kratkoperiodičnih promjena. Pored kratkoperiodičnih postoje i dugoperiodične promjene, poput steričkog efekta i eustatičkog efekta. Promjene kriosfere bile su glavni pokretači promjene razine mora kroz geološku prošlost. Kada bi nestale sve komponente koje čine današnju kriosferu, razina mora podigla bi se za 65 metara (Marshall, 2012).

Navedena mišljenja i procjene dovoljne su da se praćenju promjena kriosfere posveti velika pozornost. Ovakva praćenja zaživjela su u proteklih desetak godina zbog globalnih promjena koje očigledno mijenjaju uvjete života na Zemlji. Danas se problematika određivanja promjena kriosfere rješava pomoću različitih satelitskih misija koje se bave proučavanjem promjena Zemljina polja ubrzanja sile teže te misija satelitske

altimetrije. Zbog nedovoljne prostorne rezolucije podatci se nadopunjuju različitim lokalnim geološkim i geofizičkim in situ istraživanjima.

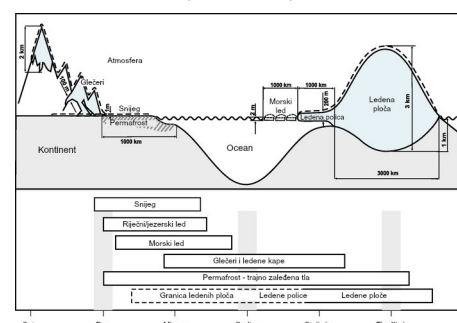
Također, upravo zbog velikog opsega djelatnosti, odnosno nužnog interdisciplinarnog pristupa, unutar Međunarodne unije za geodeziju i geofiziku (engl. International Union of Geodesy and Geophysics – IUGG) 2007. godine osnovana je nova asocijacija – IACS (engl. International Association of Cryospheric Sciences) (URL-1).

2. KRIOSFERA

Pojam kriosfera (engl. cryosphere) definiran je prema NRCC (1988) kao „dio Zemljine kore, atmosfere i hidrosfere koji je podvrgnut temperaturi nižoj od 0°C najmanje dio svake godine kontinuirano". U svrhu opažanja, modeliranja i projiciranja procjene utjecaja promjene kriosfere na Zemlju, kriosfera se razlaže na više komponenti: led na morima, sezonski snježni pokrov, glečeri, ledene kape, permafrost (trajno zaleđena tla), riječni led i led na jezerima.

Pored svih fizikalnih promjena, kriosfera je posebno osjetljiva na promjene u globalnoj srednjoj temperaturi. Kriosfera je usko povezana s globalnim klimatskim uvjetima jer se stanje kriosfere direktno reflektira na klimatske uvjete. Temperatura na Zemlji najvećim dijelom ovisi o Sunčevoj radijaciji. Kako

Slika 2. 1. Prikaz komponenti kriosfere (IPCC 2007)



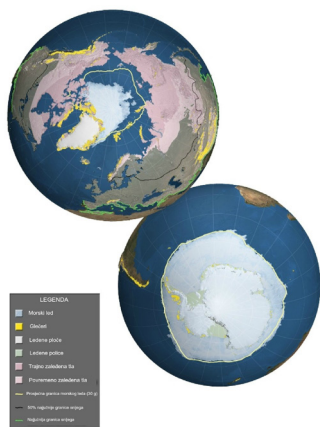
su varijacije Sunčeve radijacije skromne u razdobljima od nekoliko godina, globalno zagrijavanje Zemlje najviše ovisi o globalnom albedu (reflektivnosti planeta) koji je većinom uvjetovan količinom površine Zemlje prekrivene ledom. Smanjenjem komponenti kriosfere Sunčeva se radijacija neće reflektirati i time djelomično gubiti njezina energija već će se apsorbirati (Marshall, 2012).

Različite komponente kriosfere (Slika 2. 1.) obuhvaćaju različite dijelove Zemljine površine (Slika 2. 2.), a u skladu sa svojim karakteristikama drukčije reagiraju na globalni trend zatopljenja i na druge lokalne promjene.

2.1. MORSKI LED

Morski led predstavlja led nađen na površini mora koji je nastao smržavanjem morske vode. Manifestira se kao nepokretan led koji je vezan za kopno ili kao ledeni brijeg koji slobodno pluta. Morski je led važna komponenta klimatskog sustava i dugo je bio smatran ključnim pokazateljem potencijalnih klimatskih promjena. Proteklih godina morski je led primio veliku pažnju, kako u svakodnevnim novostima tako i u znanstvenoj literaturi, ponajviše zbog evidentnog smanjenja pokrivenosti i debljine ledenih površina na Arktiku (Walsh, 2007). Značaj morskog leda je u tome što mijenja površinski albedo, izolira oceane od gubitka topline, stvara prepreku izmjeni vodene pare i ugljikovog dioksida između oceana i atmosfere te mijenja tok morskih struja promjenom lokalnog saliniteta.

Površine pod morskim ledom na Arktičkom oceanu i na Južnom oceanu oko Antarktike imaju različite karakteristike, te u skladu s tim pokazuju različite vremenske promjene. Kroz protekle 34 godine (između 1979. i 2012.) na Arktiku je zabilježen trend smanjivanja srednjih godišnjih površina pod morskim ledom na razini od 3,8 % po desetljeću (ekvivalent veličini od 0,45 do 0,51 milijun kvadratnih kilometara po desetljeću). Prosječna zimska debljina Arktičkog morskog leda također se smanjila za otprilike 1,8 m između 1978. i 2008. godine kao i sveukupni volumen koji pokazuje trend smanjenja kroz cijelu godinu. Naprotiv navedenom, kroz isti 34-godišnji period, površine pod morskim ledom na Antarktiku pokazuju blago povećanje u razini od 1,5 % po desetljeću. Autori takvo povećanje objašnjavaju pomoću više faktora. Prvi od njih je ozonska rupa iznad Antarktike koja uzrokuje hlađenje stratosfere, a koje pak dovodi do ciklonskih vjetrova koji pospješuju stvaranje morskog leda. Nadalje, neki od razloga su i cirkulacija vodenih masa Južnog oceana te mala udaljenost kontinentalnih masa Južne Amerike. Glede debljine Antarktičkog morskog leda, postoji prema- lo mjerenja koja bi mogla s dovoljnom vjerojatnošću dokazati da li se sveukupni volumen povećava ili smanjuje (IPCC, 2013).



Slika 2. 2. Prostorni raspored komponenti kriosfere (IPCC, 2013)

2.2. SNJEŽNI POKROV

Snježni pokrov komponenta je kriosfere koja najbrže varira, a njezine varijacije ovisе prvenstveno o godišnjem dobu. Ilustracije radi, samostalna ciklonalna fronta može povećati površinu Zemlje prekrivenu snježnim pokrovom za 0,1 do 1 milijun kvadratnih kilometara u svega par dana (IPCC, 2013).

Snijeg i snježni pokrov važni su jer imaju velik utjecaj na ostale komponente kriosfere. Tako primjerice snijeg održava ledene ploče i glečere, poboljšava i ubrzava kreiranje morskog leda i može promijeniti strukturu trajno zaledenih tla. Općenito za Zemljinu klimu, kao i za ostale komponente kriosfere, važne su dvije glavne osobine snijega: vrlo visoki albedo-efekt i mala toplinska provodljivost. Snježni pokrov na morskome ledu i glečerima povećava albedo-efekt s 30 % na 80 % i time sprječava topljenje leda, odnosno snijeg djeluje kao izolator od promjenjivih vanjskih klimatskih prilika (IPCC, 2013).

Osobine snijega opažaju se korištenjem široke palete instrumenta i sustava na površini Zemlje, na platformama u avionima kao i satelitskim putem. Na površini Zemlje opažanja su realizirana formiranjem različitih mreža opažачkih stanica koje direktno mjere osobine snijega. Daljinska istraživanja uključuju opažanja terestričkih gama-zračenja iz aviona, opažanja vidljivog i infracrvenog spektra zračenja iz aviona ili iz nisko orbitalnih (engl. Low Earth Orbit – LEO) i geostacionarnih (engl. Geostationary – GEO) satelita te, naposljetku, opažanja pomoću mikrovalnih

zračenja i pozadinskog šuma s avionskih ili satelitskih platformi (IPCC, 2013).

Kroz par mjeseci snježni pokrov na sjevernoj Zemljinoj polutci varira između nula do pet milijuna kvadratnih kilometara tipično za ljetna razdoblja te do 40 milijuna kvadratnih kilometara tijekom zime. Varijacije između godina također su značajne: smanjenje površina pokrivenih snijegom na sjevernoj polutci iznosi skoro 10 % u razdoblju između 1972. i 2003. godine. Isti trend uočen je i na područjima Euroazije i Sjeverne Amerike (iako su smanjenja veća za Euroaziju) (IPCC, 2013).

2.3. GLEČERI I LEDENE PLOČE

Glečer se prema IPCC (2013) definira kao višegodišnja masa kopnenog leda koja potječe od komprimiranog snijega i dokaz je vlastite prošle ili trenutne kretnje (zbog unutrašnje deformacije ili klizanja baze glečera) i ograničene je veličine zbog unutarnjih sila. Glečer se održava i povećava akumuliranjem snijega na većim visinama, a kao ravnoteža tomu, u nizinama dolazi do topljenja ili odljeva u more. Ledena masa istog postanka kao glečer, ali kontinentalnih razmjera, naziva se ledena ploča (engl. ice sheet). Stoga su sve višegodišnje mase kopnenog leda, izuzev Grenlandske i Antarktičke ledene ploče, glečeri (IPCC, 2013).

Trenutno najbolja procjena broja i površine glečera je 170 000 glečera koji prekrivaju površinu od 730 000 kvadratnih kilometara. Gotovo 80 % od tog broja nalazi se u područjima: Antarktika, Kanadskog Arktika, visokih gorja Azije, Aljaske i Grenlanda (IPCC, 2013).

Kako bi se mjerile promjene u dužini, površini, masi i volumenu glečera, koristi se velik broj različitih mjernih metoda. Za mjerenje promjena u dužini i površini glečera koriste se analize snimki daljinskih istraživanja, a za promjenu mase i volumena satelitske misije koje mjere promjenu gravitacijskog polja Zemlje. Slične metode primjenjuju se i za mjerenje promjena ledenih ploča.

Oboje, i ledene ploče i glečeri, pokazuju smanjenja u površini i u masi, izuzev Antarktičke ledene ploče koja ima blago povećanje svih gore navedenih karakteristika (IPCC, 2013).

2.4. RIJEČNI I JEZERSKI LED

Tumačenje promjena u količini leda na jezerima i rijekama otežano je zbog nekoliko faktora. Do razvitka satelita neke su zemlje prikupljale analogne podatke za brojna jezera i rijeke u obliku različitih popisa. Većina se izdanih publikacija fokusira na opažanje promjena samo na jednom jezeru ili rijeci. Mnoga opažanja su prekinuta, pa je konzistentnost podataka upitna i nedovoljna za kvalitetno tumačenje. Podatak koji se opaža kod leda na jezerima i rijekama je datum raspada leda. Ovaj je podatak teško prikupiti jer ponekad raspadanje leda može potrajati duže od mjesec dana (IPCC, 2013).

Najopsežniji opis promjena dobio je pomoću analize 75 jezera, većinom u Skandinaviji, Sjevernoj Americi, ali i po jedan u Rusiji i Švicarskoj. Pregledavana su razdoblja od 150, 100 i 30 godina unatrag od 2005. godine. Najveće promjene pronađene su u periodu od 1975. do 2005. godine. Utvrđeni su trendovi jesenskog zaledivanja 1,6 dana kasnije i proljetnog odleđivanja 1,9 dana ranije po desetljeću. Prema Wang i dr. (2012), korištenjem tjednih satelitskih snimki ovog područja utvrđeno je smanjenje debljine leda na sjeveru američkih Velikih jezera u periodu između 1973. i 2010. za 71 % (IPCC, 2013).

2.5. TRAJNO ZALEĐENA TLA

Trajno zaledeno tlo (engl. permafrost) je tlo, kamen, sedimentni materijal ili bilo koji drugi Zemljin građevni materijal s temperaturom ispod 0°C dvije ili više godina uzastopno. Trajno zaledena tla prekrivaju većinu Arktičkih kopnenih krajeva kao i Rusku i Kanadsku tundru, a ponekad se na jug prošire sve do Mongolije. Prisutna su i na dosta nižim geografskim širinama, primjerice u alpskim predjelima. Trajno zaledena tla dijelimo na trajno zaledena tla ispod površine (engl. terrestrial permafrost) i na trajno zaledena tla ispod morskog dna (engl. subsea permafrost) (IPCC, 2013).

Veličine kojima se determinira promjena trajno zaledenih tla su dubina (debljina) i temperatura. Temperatura se mjeri na dubini gdje sezonske varijacije površinske temperature nemaju utjecaj. Ova dubina na većini opažачkih stanica je 20 metara. Još jedna od veličina je debljina aktivnog sloja, odnosno sloja koji se topi i zaleđuje ovisno o godišnjem dobu.

Trend u debljini aktivnog sloja trajno zaledenog tla je smanjuje se i iznosi 90 centimetara od 1980-ih. Računajući od iste godine, temperatura trajno zaledenog tla povećala se za 2 °C. Južna granica trajno zaledenog tla na sjevernoj polutci kontinuirano se pomiče sjevernije od 1970-ih (IPCC, 2013).

2.6. SREDNJA RAZINA MORA I KRIOSFERA

Povišenje srednje razine mora predstavlja najvažniju posljedicu globalnih klimatskih promjena i ima mogućnost signifikantnog utjecaja na ekosustave i društvo. Promjene srednje razine mora izravno će utjecati na statičku stabilnost obalnih područja.

Srednja razina mora na obalama definira se pomoću mareografa tijekom određenog razdoblja. Najčešće se za razdoblje uzima Mjesečev ciklus (18,6 godina) kako bi se što kvalitetnije eliminirao utjecaj fluktuacija mora uzrokovanih valovima i silom Zemljinih plimnih valova (Pribičević, 2005). Promjene srednje razine mora, mjerene lokalnim mareografima, nazivaju se relativne promjene razine mora jer mogu biti uzrokovane ili vertikalnim pokretima obale na kojoj je postavljen mareograf ili vertikalnim gibanjem mora zbog klimatskih i drugih uvjeta. Kako bi se navedeni efekti međusobno poništili i rezultirali apsolutnom srednjom razinom mora, potrebno je od podataka mareografa oduzeti vertikalno gibanje kopna (Walsh, 2007).

U odsutnosti vertikalnih gibanja kopna kopnenih površina, postoje samo dvije glavne komponente koje djeluju na povišenje srednje razine mora (Walsh, 2007):

+ sterički efekt – proces koji uzrokuje povećanje obujma oceana ne kroz promjenu mase oceana već kroz promjenu gustoće, primarno kroz promjene temperature (termalna ekspanzija) ili saliniteta i

+ eustatički efekt – proces povećanja masa morske vode. Povećano otapanje leda iz kopnenih površina (glečeri i ledene ploče) primarni su uzroci ovog efekta.

Kroz eustatički efekt, kriosfera preko svojih kopnenih komponenti neposredno doprinosi povišenju srednje razine mora. Za zanemariti nije ni sterički efekt kojem doprinosi već objašnjeni morski led kroz povećanje lokalnog saliniteta. Različiti autori veću važnost daju ili jednom ili drugom efektu, ali u jednom se slažu, a to je kontinuirano povišenje srednje razine mora kroz blisku prošlost (Walsh, 2007).

Tako se primjerice, prema IPCC-u (2001), srednja razina mora podigla više od 120 metara unazad 20 000 godina kao rezultat gubitka masa zbog topljenja ledenih ploča nastalih tijekom zadnjeg ledenog doba. Navodi se i podatak dobiven geološkim opažanjima koji govori o povišenju globalne srednje razine mora na razini od 0,5 milimetara godišnje u zadnjih 6000 godina i 0,1 milimetar godišnje u zadnjih 3000 godina. Isti izvor navodi vrijednost trenutne brzine povišenja srednje razine mora, koja iznosi 1-2 milimetra godišnje. Podatci dobiveni iz PSMSL (engl. Permanent Service for Mean Sea Level) mreže, za zadnjih 70 godina, daju brzinu od 2 milimetra godišnje.

3. SATELITSKE MISIJE ZA PROUČAVANJE KRIOSFERE

Prema istraživanjima Europske svemirske agencije (engl. European Space Agency – ESA) postoji nekoliko glavnih značajki kriosfere koje je potrebno proučiti (Kern, 2012):

+ izmjeriti distribuciju morskih ledenih masa i odgovarajuće količine slatke vode, procijeniti osjetljivost morskog leda na klimatske promjene i razumjeti termodinamičke i dinamičke odgovore na ocean i atmosferu

+ izmjeriti ravnotežu masa zemljanih ledenih pokrova, ledenih kapa i ledenjaka/glečera, odijeliti njihove relativne doprinose globalnoj promjeni razine more i razumjeti njihove buduće osjetljivosti na klimatske promjene kroz dinamičke procese

+ razumjeti ulogu snijega i ledenjaka u utjecaju na globalni ciklus vode i regionalne izvore vode, identificirati poveznice s atmosferom i ocijeniti moguće buduće trendove/moguća buduća kretanja

+ izmjeriti utjecaj plićih santi leda, odljeva rijeka na velikim visinama i otapanja leda na zemlji na globalne termohaline cirkulacije i razumjeti osjetljivost svakog od ovih izvora slatke vode na buduće klimatske promjene i

+ izmjeriti trenutne promjene koje se događaju na mjestima permafrosta i zaleđenog kopna, shvatiti njihov odgovor na ostale komponente klimatskog sustava i procijeniti njihovu osjetljivost na buduće klimatske prisile.

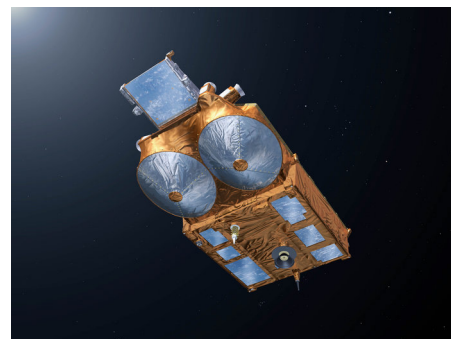
Satelitska promatranja jedinstven su način za proučavanje svih tih značajki na velikim prostorima u dugim razdobljima.

3.1. CRYOSAT

Misija CryoSat najznačajnija je misija za proučavanja kriosfere i jedna od prvih satelitskih misija za istraživanje Zemlje (engl. Earth Explorer Opportunity Mission series). Nakon neuspješnog lansiranja 2005. godine misija je obnovljena sa satelitom CryoSat-2 (Slika 3. 1.) koji je lansiran u travnju 2010. godine. Misija je dizajnirana kako bi odredila međugodišnje

promjene u kopnenom i morskom ledu na Zemlji. CryoSat misija osmišljena je za nominalni vijek od tri godine, uz prethodno fazu lansiranja i ranog boravka u orbiti (engl. Launch and Early Orbit Phase) te fazu stavljanja u funkciju (engl. Commissioning Phase). Satelit leti na visini od 717 km te doseže širine od 88° sjeverno i južno od ekvatora kako bi se maksimalno pokrili

Slika 3. 1. CryoSat satelit sa strane okrenute Zemlji (URL-1)

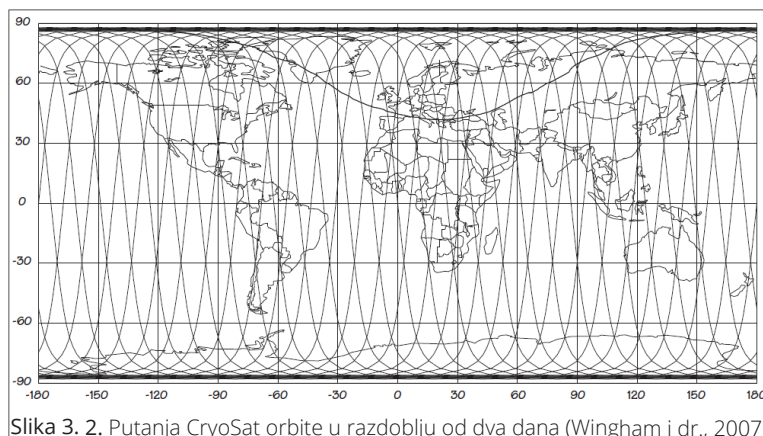


polovi (Slika 3. 1.). Altimetar promatra promjenjivost u podizanju morskog i kopnenog leda pomoću promjena u protoku masa iz atmosfere i oceana te promjena u gustoći snijega i leda. Kako bi odredio trend promjene, CryoSat mora uzimati uzorke za promjenu razine leda preko polarnih regija više puta tijekom svog životnog vijeka. Srednja varijacija te promjene računa se prema određenim prostornim skalama na kojima osrednjavanje omogućuje redukcije grubih pogrešaka.

CryoSatom se upravlja sa zemaljske stanice u Kiruni (Švedska). Glavne uloge zemaljske stanice su: planiranje misije (uključujući održavanje i promjene načina rada altimetra), obrada, arhiviranje i distribucija podataka (URL-2).

3.1.1. INSTRUMENTARIJ

CryoSat ima precizne instrumente dizajnirane kako bi točno snimile površinsku topografiju ledenih kapa te, za razliku od dotadašnjih misija, površine morskog leda. Neke od ranijih misija pokazale su da se protok masa može dobro odrediti korištenjem radarskog altimetra. Kako bi se ovi rezultati proširili na regije pokrivene morskim ledom i na rubove ledenih kapa, bilo je potrebno poboljšati prostornu razlučivost mjernog sustava altimetra. Zbog toga je za CryoSat korišten radarski altimeter visoke prostorne razlučivosti. To se postiglo dodavanjem radara sa sintetičkom antenom (engl. synthetic aperture radar) i interferometra klasičnom altimetru kao što su EnviSat RA-2 (engl. Environmental Satellite Radar Altimeter 2) ili Poseidon. Te spoznaje dovele su do glavnog instrumenta CryoSata – SIRAL-a (engl. Synthetic Aperture Interferometric Radar Altimeter). Radarski altimeter na CryoSatu može raditi u nekoliko različitih načina, optimizirano za mjerenja iznad različitih površina. Klasični način niske rezolucije (engl. low resolution mode) koristi se za mjerenja središnjih regija ledenih kapa te preko nekih dijelova oceana. SAR (engl. Satellite Apperture Radar) način omogućuje povećanje prostorne rezolucije uzduž putanje te se koristi kod morskog leda kako bi se omogućila mjerenja preko relativno uskih ploča otvorenog mora što ne bi bilo moguće razlučiti načinu niske rezolucije. Orijentacija bazne linije interferometra mora biti veoma točno izmjerena u letu jer i male greške u kutu ljujanja uzrokuju znatne greške u elevaciji točaka koje nisu točno u nadiru. Zbog toga instrumentarij uključuje i set uređaja za praćenje zvijezda (engl. star trackers), koji su čvrsto priključeni na interferometar. To omogućuje određivanje orijentacije bazne linije u zvezdanom referentnom okviru (Wingham i dr., 2007). Kao i s bilo kojim drugim altimetrom, precizno određivanje orbite nužno je kako bi za svako mjereno područje znali elevaciju (Slika 3. 2.). Pri tome se koriste DORIS (engl. Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite) i SLR (engl. Satellite Laser Ranging) koji mjerenjem relativne brzine daju tražene informacije.



Slika 3. 2. Putanja CryoSat orbite u razdoblju od dva dana (Wingham i dr., 2007)

3.1.2. REZULTATI

Glavni produkt CryoSat misije su tzv. podatci razine 2 (engl. Level 2) koji se zovu i geofizički zapis (engl. Geophysical Data Record). Oni sadrže elevaciju po putanji sa svim pomoćnim podacima. Uključuju informacije o vrsti površine za svakih 20 Hz zapisa, što omogućuje klasifikaciju vrste površine (ocean, zemlja, kontinentalni led, zatvoreno more) za odgovarajuću mjernu lokaciju. Klasifikacija dolazi iz modela dobivenog iz ESA-ine geofizičke knjižnice. CryoSat Level 2 podatci pružaju podatke o visini površine u odnosu na WGS84 elipsoid. CryoSat Level 2 podatci uključuju i informacije o dubini snijega svakih 30 dana napravljene s klimatološkim modelom te određuju gustoću snijega s frekvencijom od 1 Hz. Pružaju i informacije o koncentraciji leda u moru s frekvencijom od 1 Hz (URL-3).

3.2. GRACE SATELITSKA MISIJA

GRACE (engl. Gravity Recovery and Climate Experiment) misija započela je u ožujku 2002. godine. Sastoji se od dva satelita koji se nalaze na međusobnom razmaku od približno 220 km i na visini od 450–500 km iznad Zemljine površine. Glavna zadaća ove misije je određivanje geoida te vremenskih promjena gravitacijskog polja Zemlje. Štoviše, ovo je prva satelitska misija koja je omogućila mjerenje pojedinosti vremenskih promjena gravitacijskog polja uslijed npr. otapanja ledenih pokrova, promjena u masi morske vode i hidrologije kontinenata. Podatci se ovom misijom dobivaju svakih mjesec dana i na temelju njih se izrađuju modeli gravitacijskog polja Zemlje. Prostorna rezolucija s kojom se može odrediti geoid iznosi otprilike 300 km (Rummel, 2011).

Prilikom analize i obrade podatci se korigiraju za utjecaj oceanskih i atmosferskih varijacija ubrzanja sile teže te za utjecaj plimnih valova i na temelju tih podataka se proučavaju glacijalno-izostatske promjene (Gunter i dr., 2014).

3.2.1. PROUČAVANJE PROMJENA KRIOSFERE NA ANTARKTICI

Jedna od zadaća GRACE misije bilo je proučavanje promjena tlaka na dnu Južnog oceana i time se došlo do novih spoznaja o ledenom pokrovu na Antarktici. Gotovo sve studije temeljene na GRACE podacima pokazale su značajan negativni trend integralne mase Antarktičkog leda i to reda od nekoliko desetina do nekoliko stotina Gt (1Gt = 1012 kg). Međutim, prilikom procjena promjene mase dolazi do velikih razlika uslijed netočnosti modela. To se ponajprije odnosi na nedovoljno točno poznavanje glacijalno-izostatskih promjena, tj. deformacija Zemljine kore nastalih uslijed sporog vraćanja plašta koji je bio opterećen ledom za vrijeme posljednjeg ledenog doba prije 21 000 godina. Podatci dobiveni GRACE misijom ne mogu razlučiti razliku u promjeni gravitacijskog polja uzrokovanu otapanjem ili stvaranjem leda od varijacije uzrokovane postglacijalnim izdizanjem Zemljine kore. Kao rezultat te činjenice, iz modela se isključuju podatci vezani za efekt glacijalno-izostatskih promjena i uzimaju se unaprijed modelirane vrijednosti. Te modelirane vrijednosti nisu dovoljno dobro određene za područje Antarktike zbog prerijetkih geofizičkih i klimatskih podataka. Sve to uzrokuje predviđanje trenda gubitka mase leda nedovoljno pouzdanim (Gunter i dr., 2014).

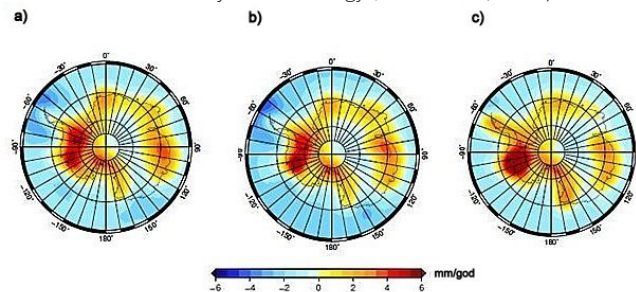
Da bi se dobio dobar model za glacijalno-izostatske promjene koristi se kombinacija GRACE podataka s podacima dobivenih satelitskom altimetrijom. Altimetrija omogućuje praćenje promjene volumena leda, dok GRACE misija omogućuje određivanje promjena mase. Na temelju tih podataka mogu se razlučiti glacijalno-izostatske promjene i promjene ledene mase, uz poznavanje gustoće leda i čvrste Zemlje (Gunter i dr., 2014).

3.2.2. REZULTATI

Za obradu altimetrijskih podataka korištena je tehnika preklapanja podataka koja je prvi put upotrijebljena za studiju ledenog pokrova na Grenlandu. Bazira se na principu preklapanja laserskih snimaka iz bilo kojih dviju mjerenih kampanja. Ova je tehnika pogodna za Antarktiku s obzirom na veliku gustoću laserskih snimaka za ovo područje. Potrebno je napomenuti da laserske snimke korištene u istraživanju imaju sustavnu pogrešku koja može iznositi i do 1 cm ako se zanemari. Usporedbe radi, ako se za glacijalno-izostatske promjene dobije odstupanje od 1 mm na razini cijele Antarktike, dobila bi se pogreška promjene mase reda veličine 50 Gt god⁻¹ (Gunter i dr., 2014).

Kako bi se smanjio utjecaj tih pogrešaka odabrano je područje Antarktike koje služi kao kalibracijska zona. To područje nalazi se na jednom od najsuših dijelova svijeta i zove se zona smanjenih oborina (engl. Low-precipitation zone) i nalazi se u istočnoj Antarktici. Razlog što je to područje uzeto kao kalibracijska zona je to što je zbog malih oborina i promjena visine površine mala. Uz to, zona pokriva veliko područje što pridonosi povećanju pouzdanosti podataka.

Slika 3. 3. Procjena glacijalno-izostatskih promjena dobivena kombinacijom podataka u: a) University of Texas, b) GeoForschungsZentrum, c) Delft University of Technology (Gunter i dr., 2014)



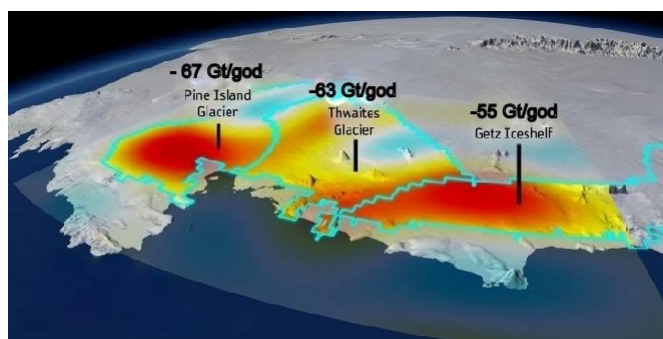
Procjena glacijalno-izostatskih promjena (Slika 3. 3.) i podatci o pripadajućim promjenama ledenih masa izrađeni su za razdoblje od veljače 2003. do listopada 2009. godine. Podatci pokazuju da godišnja promjena ledene mase na Antarktici iznosi otprilike -100 Gt. Međutim, treba uzeti u obzir da je nesigurnost određivanja promjene mase velika. Primjerice za promjenu ledene mase ta nesigurnost iznosi 44 Gt god⁻¹ (Rummel i dr., 2011).

3.3. GOCE SATELITSKA MISIJA

ESA je 2009. godine započela satelitsku misiju GOCE (engl. Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer). Glavna zadaća misije je određivanje Zemljinog gravitacijskog polja i geoida. Satelit se nalazi na udaljenosti od 255 km iznad Zemlje i sadrži gravitacijski gradiometar i GPS prijatelj. Gravitacijski gradiometar omogućuje razlučivanje slabih signala Zemljinog gravitacijskog polja. GOCE satelitska gradiometrijska mjerenja prikupljaju druge derivacije potencijala gravitacijskog polja (Hećimović i Bašić, 2005). U kolovozu 2012. godine promijenjena je orbita satelita s ciljem dobivanja točnijih mjerenja veće rezolucije (URL-1).

Dok GRACE mjeri vremenske promjene gravitacijskog polja, s ograničenom prostornom rezolucijom, GOCE mjeri stacionarno gravitacijsko polje s maksimalnom prostornom rezolucijom od 100 km (Rummel i dr., 2011). GOCE je prva misija satelitske gradiometrije gravitacijskog polja Zemlje (engl. Satellite gravity gradiometry). Rezultat mjerenja su elementi tenzora gradijenata ubrzanja sile teže koji se koriste za modeliranje gravitacijskog polja velike rezolucije (Hećimović i Bašić, 2005). Rezultat GOCE misije je model geoida koji je predstavljen površinom idealnog globalnog oceana u odsutnosti plimnih valova i oborina. Taj će model poslužiti kao referentna ploha za provođenje mjerenja cirkulacije oceana, promjene razine mora i dinamike leda (Herceg i dr., 2014).

3.3.1. GOCE U PROUČAVANJU KRIOSFERE



Slika 3. 4. Promjena mase leda dobivena GOCE misijom (URL-1)

Analizirana mjerenja GOCE misije za razdoblje od 2009. do 2012. godine pokazuju da je došlo do smanjenja ubrzanja sile teže na području Antarktike, dijelom uzrokovano upravo promjenom mase ledenih pokrova (posebno na zapadnoj Antarktici) (URL-1).

GOCE rezultati bi također, kombinacijom sa satelitskom altimetrijom, pridonijeli boljem razumijevanju u promjeni ledenih pokrova i razine mora. Podatci bi se mogli kombinirati s onima dobivenim od satelita CryoSat koji upućuju da se stopa gubitka leda svake godine povećava otprilike dva puta za Grenland i tri puta za zapadni Antarktiku. (Herceg i dr., 2014).

Iz dobivenih podataka (Slika 3. 4.) vidi se da je prisutan trend gubitka leda i da to uzrokuje povećanje razine mora za 0,51 mm na godinu (URL-1).

3.3.2. PREDIKCIJA PROMJENE MASE KORIŠTENJEM GOCE GRAVITACIJSKIH GRADIJENATA NA PODRUČJU GRENLANDA

Da bi se mogli analizirati gravitacijski gradijenti dobiveni GOCE misijom, provedena je studija na području najvećeg ledenjaka na zapadnoj obali Grenlanda, zvanog Jakobshavn Isbrae. Ovaj je ledenjak izgubio najviše mase i tijekom posljednjeg desetljeća je njegov doprinos povećanju razine mora udvostručen (Howat i dr., 2011). Gradijentima su definirane promjene ubrzanja sile teže u određenom smjeru. Vertikalna komponenta promjene ubrzanja sile teže (Wzz) je promjena ubrzanja sile teže s visinom.

Gravitacijske anomalije koje proizlaze iz promjene topografije mogu se aproksimirati Bouguerovom korekcijom. Mase su u tom slučaju aproksimirane Bouguerovom pločom koja je ravna, homogena i beskonačna. Uz pretpostavku da je površina prekrivena samo ledom čija je gustoća 920 kg m⁻³, Bouguerova korekcija (Herceg i dr., 2014) :

$$\delta g_B = 0.0386h \text{ (} 10^{-5} \text{ ms}^{-2}\text{)}$$

Pomoću gornjeg izraza (3. 1.) izračunate su promjene u gravitaciji koje proizlaze iz promjena ledene mase. Gravitacijske promjene iznose $\pm 2 \cdot 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$. Na mjestima gdje su najveće promjene ledenog pokrova, najveće su i promjene u gravitaciji. Promjene anomalija izračunate pomoću vertikalnog gradijenta pokazuju puno veće varijacije koje iznose $\pm 30 \cdot 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$ (Slika 3. 5.) u razdoblju od studenog 2009. do lipnja 2010. Smatra se da je razlog tome pogreška koja se vjerojatno nalazi u podatcima gradijenata (Herceg i dr., 2014).

Rezultati pokazuju varijaciju promjene mase leda u iznosu $\pm 50 \cdot 10^3 \text{ kg}$. Da bi se moglo bolje predvidjeti promjenu mase pomoću vertikalnog gradijenta, trebalo bi imati višegodišnje podatke (Herceg i dr., 2014).

4. ZAKLJUČAK

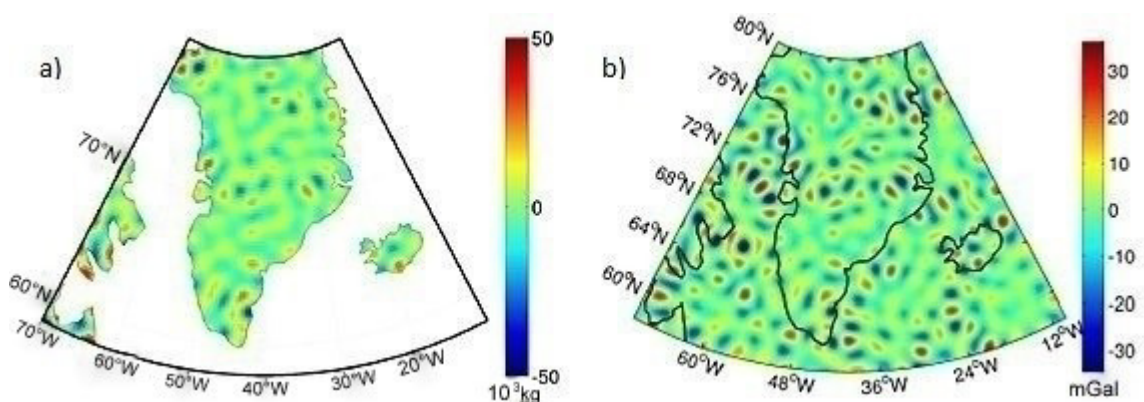
Zahvaljujući razvoju novih i naprednih tehnika satelitskih mjerenja omogućen je značajan iskorak u proučavanju kriosfere. Kombinacijom mjerenja radarskih altimetara s mjerenjima promjene Zemljinog polja ubrzanja sile teže dobiju se informacije o ponašanju ledenih masa, kako na oceanima tako i u kopnenim predjelima.

Najznačajniji produkt satelitskih mjerenja kriosfere odnosi se na definiranje utjecaja globalnih klimatskih promjena na promjene u ledenom pokrovu Zemlje. Pri tome su dobiveni različiti podatci vezani uz različite promatrane komponente kriosfere. Unatoč sezonskim varijacijama Arktičkog leda, podatci prikupljeni tijekom dužeg razdoblja pokazuju konstantni padajući trend u prostiranju ledenih površina tijekom svih godišnjih doba (do 50 tisuća km² u godini). CryoSat će u budućnosti pokušati ustanoviti odnosi li se taj trend i na promjenu volumena leda. Nasuprot tome, na Antarktici je zabilježeno povećanje ledenih površina. Istovremeno je pomoću GRACE misije dobiven glacialno-izostatski model koji daje podatak o smanjenju ledene mase na Antarktici (-100 Gt). Analizom podataka GOCE satelitske misije ustanovljen je utjecaj promjene mase na smanjenje ubrzanja sile teže u području Antarktike.

Direktna posljedica utjecaja globalnih klimatskih promjena na kriosferu je promjena srednje razine mora. Globalna srednja razina mora u stalnom je porastu i trenutna vrijednost brzine njezinog povećanja iznosi oko 2 milimetra godišnje, pri čemu pod utjecaj otapanja leda pripada 0,51 milimetar godišnje. Praćenje promjena razine mora od ključne je važnosti budući da je većina svjetskog stanovništva naseljeno u obalnim područjima.

Kako bi se napravili daljnji iskoraci u satelitskom proučavanju kriosfere, potrebno je uložiti znatna sredstva u razvoj korištenih tehnologija i implementaciju novih. To se prvenstveno odnosi na povećanje različitosti satelitskih altimetara i satelita za proučavanje Zemljinog polja ubrzanja sile teže. Na kraju, bitno je usporedbom podataka različitih satelitskih misija doći do konačnih spoznaja o ponašanju ledenog pokrova Zemlje.

Slika 3. 5. a) Promjena mase dobivena promatranjem Wzz gravitacijskih gradijenata, b) promjene gravitacije dobivene pomoću Wzz gradijenata (Herceg i dr., 2014)



5. LITERATURA

- + Bašić, T. (2014): *Fizikalna geodezija, predavanja*, Geodetski Fakultet
- + Drinkwater M. R., Francis, R., Ratier, G., Wingham, D. J. (2004): *The European Space Agency's Earth Explorer Mission CryoSat: Measuring Variability in the Cryosphere*, *Annals of Glaciology*, Svezak 39, str. 313 – 320.
- + Fitzhariss, B. (1995): *The Cryosphere: Changes and their Impacts*, *IPCC Second Assessment Report: Climate Change*, poglavlje 7, str. 241 – 265.
- + Fountain, A. G., Campbell, J. L., Schuur, E. A. G., Stammerjohn, S. E., Williams, M. W., Ducklow, H. W. (2012): *The Disappearing Cryosphere: Impacts and Ecosystem Responses to Rapid Cryosphere Loss*. *BioScience*, br. 62, str. 405 – 415.
- + Gunter, B. C., Didova, O., Riva, R. E. M., Ligtenberg, S. R. M., Lenaerts, J. T. M., King, M. A., van den Broeke, M. R., Urban, T. (2014): *Empirical estimation of present-day Antarctic glacial isostatic adjustment and ice mass change*, *The Cryosphere*, svezak br. 8/2014, str. 743 – 760.
- + Hansen, J., Sato, M., Kharecha, P., Russell, G., Lea, D. W., Siddall M. (2007): *Climate change and trace gases*. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, br. 365, str. 1925 – 1954.
- + Hećimović, Ž. i Bašić, T. (2005): *Satelitska misija Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer (GOCE)*, *Geodetski list*, 4, str. 253 – 265.
- + Herceg M., Tscherning, C. C., Levinsen, J. F. (2014): *Sensitivity of GOCE gradients on Greenland mass variation and changes in ice topography*, *Journal of Geodetic Science*. Svezak 4, poglavlje 1, str. 8 – 18.
- + Howat, I. M., Ahn, Y., Joughin, I., van den Broeke, M.R., Lenaerts, J.T. M., Smith, B. (2011): *Mass balance of Greenland's three largest outlet glaciers, 2000 – 2010*, *Geophysical Research Letters*, Vol.38
- + Kern, Michael (2012): *Future Missions for the Cryosphere*, *Prezentacija*, European Space Agency
- + Marshall, S. J. (2011): *The Cryosphere*, *Knjiga*, Princeton University Press, New Jersey
- + NRCC, (1988): *Glossary of Permafrost and Related Ground-ice Terms*. *Permafrost Subcommittee*, National Research Council of Canada, *Technical Memorandum 142*
- + Pribičević, B. (2005): *Pomorska geodezija*. Sveučilište u Zagrebu, *Geodetski fakultet Zagreb*
- + Rummel, R., Horwath, M., Yi, W., Albertella, A., Bosch, W, Haegmans, R. (2011): *GOCE, Satellite Gravimetry and Antarctic Mass Transports*, *Surveys in Geophysics*, 32, str. 643 – 657.
- + Vaughan, D.G., Comiso J.C. (2013): *Observations: Cryosphere*, *IPCC Fifth Assessment Report: Climate Change*, poglavlje 4, str.317 – 382.
- + Walsh, J. (2004): *Cryosphere and Hidrology*. *Znanstveni izvještaj ACIA (engl. Arctic Climate Impact Assessment)*, poglavlje 6, str. 183 – 242
- + Wingham, D. J., C. R. Francis, S. Baker, C. Bouzinac, D. Brockley, R. Cullen, P. de Chateau-Thierry, S.W. Laxon, U. Mallow, C. Mavrocordatos, L. Phalippou, G. Ratier, L. Rey, F. Rostan, P. Viau and D.W. Willis (2007) : *Mission and Data Description*, ESA, Nizozemska
- + URL-1: Istraživanje GOCE http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/GOCE/GOCE_reveals_gravity_dip_from_ice_loss (26. 11. 2014.)
- + URL-2: CryoSat-2 općenito http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_Planet_Programme/Earth_Explorers/CryoSat-2/Overview3 (29. 11. 2014.)
- + URL-3: <http://cryosat.mssl.ucl.ac.uk/qa/mode.php> (28. 11. 2014.)