

# Morski led na Arktiki dosegel novo dno – najmanj ledu od leta 1979 dalje

Gregor Vertačnik, Oktober 2012

## Uvod

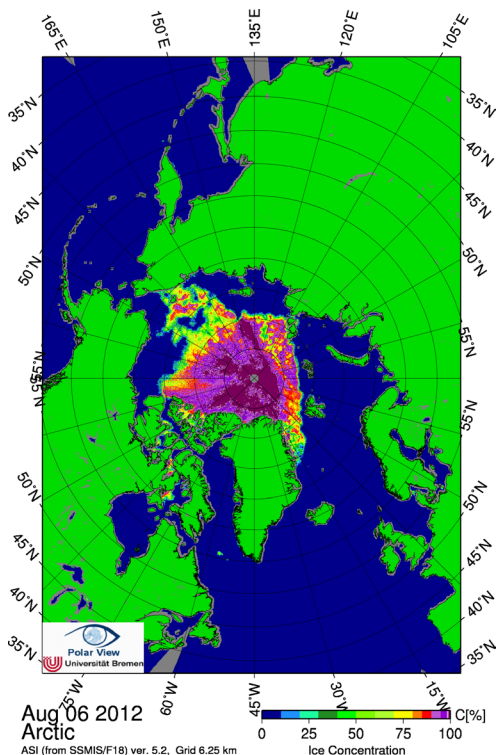
V preteklih dveh mesecih so številni mediji poročali o najmanjši pokritosti Arktike z morskim ledom od začetka satelitskih meritev pred dobrimi tremi desetletji. Tiste, ki že dlje časa spremljamo dogajanje »tam daleč na severu«, ta rekord ni posebno presenetil, saj smo bili poleti 2007 priča še bolj dramatični spremembi. Krčenje morskega ledu na severu je eden od najočitnejših kazalcev globalnega ogrevanja. Negativen trend je očiten v vseh letnih časih, zlasti poleti.

## Zgodovina satelitskih meritev

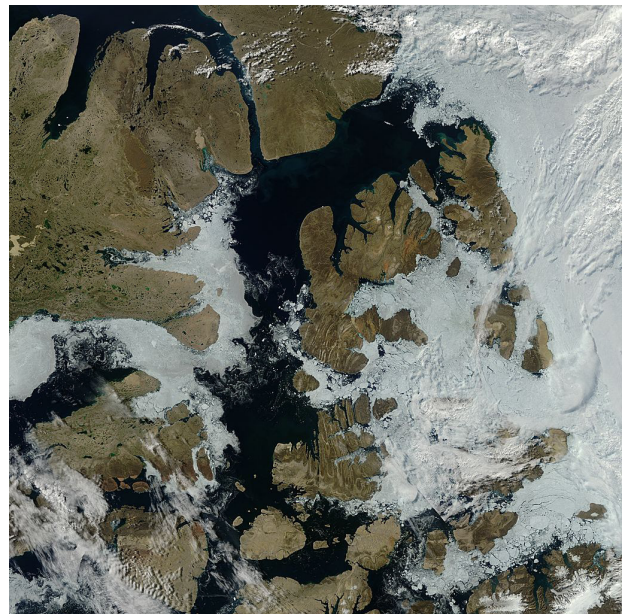
Leta 1960 je bil izstreljen prvi »uspešen« vremenski satelit, TIROS-1. Na Zemljo je posredoval številne slike vremenskega dogajanja na našem planetu. Od takrat so sateliti počasi, a zanesljivo pridobivali vse pomemb-

nejšo vlogo v razumevanju in spremljanju Zemljinega površja, ozračja in morij. Z izstrelitvijo Nasinega satelita SMMR leta 1978 se je začela doba zanesljivih in podrobnih meritev ledu in snega na Zemljinem površju.

Pri izračunu obsega morskega ledu na Arktiki in Antarktiki se znanstveniki večinoma poslužujejo satelitskih meritev v mikrovalovnem delu spektra (slika 1). V tem območju valovnih dolžin seva led znatno močnejše od vode, medtem ko so oblaki vsaj deloma prosojni za tovrstno sevanje. To omogoča stalne, neprestane meritve in s tem vpogled v dinamiko morskega ledu. Od prvih meritev pred dobrimi tremi desetletji so se merilne naprave sicer nekajkrat zamenjale, a se da njihove meritve dobro uskladiti.



Slika 1. Satelitska slika v mikrovalovnem delu spektra 6. avgusta 2012. Barvna lestvica prikazuje delež pokritosti morja z ledom. Vir: Univerza v Bremnu



Slika 2. Satelitska slika v vidnem delu spektra 2. avgusta 2012, ki prikazuje taljenje ledu v delu Kanadskega arktičnega arhipelaga. Vir: NASA Earth Data

Pomembne podatke o morskem ledu prav tako prispevajo satelitske slike v vidnem delu spektra (npr. Nasina satelita Aqua in Terra, slika 2) in meritve nadmorske višine površja ledu (Cryosat-2, slika 3). Slednji podatki

so nujno potrebni za zanesljivo oceno prostornine morskega ledu.



Slika 3. Umetniški portret satelita Cryosat-2. Vir: Evropska vesoljska agencija

## Osnovni pojmi za opis stanja ledu

Pri opisu stanja morskega ledu kot celote se najpogosteje srečujemo z naslednji pojmi. Površina morskega ledu je tloris ledenih plošč. Obseg običajno predstavlja tloris tistih morskih območij, kjer led zavzema vsaj 15 % površine morja. Obseg je tako enak ali večji površini morskega ledu. Koncentracija predstavlja delež prekritosti morja z ledom. Pomemben podatek je tudi prostornina ledu, ki je poleg površine vezana na debelino ledu. Slednja je močno odvisna od starosti in letnega časa. Morski led, ki se tvori na poletu ali jeseni nezaledenem morju, se poleti običajno stali. Nekaj let star led je trši in svetlejši od enoletnega ledu, zato običajno deloma preživi talilno sezono, iz območja Arktike pa



Slika 4. Shema morskih tokov na Arktiki. Najpomembnejša sta Beaufortov vrtinec nad osrednjo Arktiko, v katerem led kroži v smeri urinega kazalca, in transpolarni tok s sirske obale proti Grenlandiji. Vir: Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP)

ga proti južnim geografskim širinam počasi odvajata veter in morski tokovi (slika 4). Navadno enoletni led ob koncu zimske sezone doseže meter do dva debeline, večletni pa lahko preseže debelino petih metrov.

## Viri podatkov

V prejšnjem poglavju smo omenili, kakšne vrste satelitskih podatkov so nam na voljo. Zdaj si oglejmo, kje na spletu so dosegljivi splošni javnosti. Na koncu članka je seznam pripadajočih spletnih naslovov.

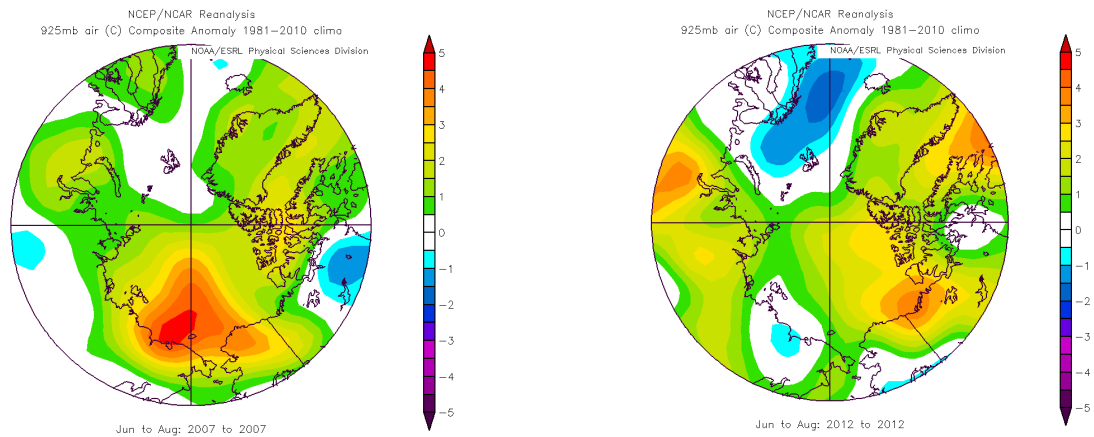
Trenutno se z preučevanjem in rednim spremljanjem obsega, površine ali prostornine morskega ledu na Arktiki ukvarja nekaj raziskovalnih ustanov po svetu. Med temi je verjetno najbolj poznano ameriško Državno središče za podatke o ledu in snegu (National Snow and Ice Data Center). Na svoji spletni strani redno objavlja poročila o stanju ledu in vremena na območju Arktike in osvežuje grafični prikaz obsega ledu. Najbolj izčrpne podatke o površini ledu najdemo na spletni strani Cryosphere Today, kjer Univerza v Illinoisu vsakodnevno osvežuje časovni potek za posamezna morja in Arktiko ter Antarktiko kot celoto. Najkakovostnejše podatke o prostornini ledu najdemo na straneh Središče za polarno znanost Univerze v Washingtonu (PSC), kjer poganjajo model PIOMAS. Na Japonskem je za led »pristojna« Japonska raziskovalna agencija za ozračje in vesolje (Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA). Na njihovi spletni strani je lep grafični prikaz časovnega poteka obsega ledu v različnih obdobjih, s spletne strani pa si lahko prenesemo taiste podatke. Za konec omenimo še spletno stran Danskega meteorološkega inštituta, kjer dnevno osvežujejo graf obsega ledu.

Na spletu je moč najti tudi podrobne dnevne karte in satelitske slike, ki prikazujejo stanje ledu na skrajnem severu. Univerza v Bremnu na svoji spletni strani ponuja podrobne karte koncentracije morskega ledu na podlagi satelitskih slik v mikrovalnem delu spektra. NASA ponuja prečudovito kompozitno satelitsko sliko v vidnem delu spektra, ki je dosegljiva na strani. S klikom miške na izbrano območje si lahko podrobneje ogledamo posamezne predele Arktike.

Ameriško Državno središče za podnebne podatke (NCDC) objavlja mesečna poročila o stanju podnebja po svetu, običajno tudi z opisom morskega ledu. Poleg omenjenih spletnih strani so izčrpen vir informacij nekateri blogi, recimo Arctic Sea Ice Blog, RealClimate in Open Mind.

## Dramatično leto 2012

Prvo veliko presenečenje v satelitski dobi meritev je morski led na Arktiki prinesel leta 2007. Že prej osla-

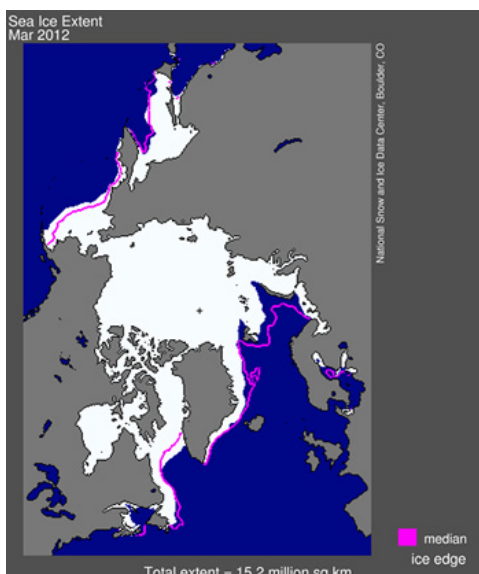


Slika 5. Povprečni temperaturni odklon na pritiskovi ploskvi 925 hPa (slab kilometer nadmorske višine) nad 60° severne geografske širine v meteorološkem poletju 2007 (levo) in 2012 (desno). Vir: NOAA/ESRL Physical Sciences Division, Boulder, Colorado

bljeni ledeni pokrov sta močno načela pogost dotok tople zračne mase iznad Rusije in nadpovprečno sončno vreme (slika 5). Septembrski minimum je bil daleč pod vsemi od leta 1979. Naslednja poletja so bila vremensko bolj prizanesljiva do ledu in minimum v obsegu je bil do vključno leta 2011 nekoliko višje od leta 2007, a nižje od vseh prejšnjih let. V tem času pa je močno upadla prostornina ledu, zlasti ob nekakšni prelomnici leta 2010.

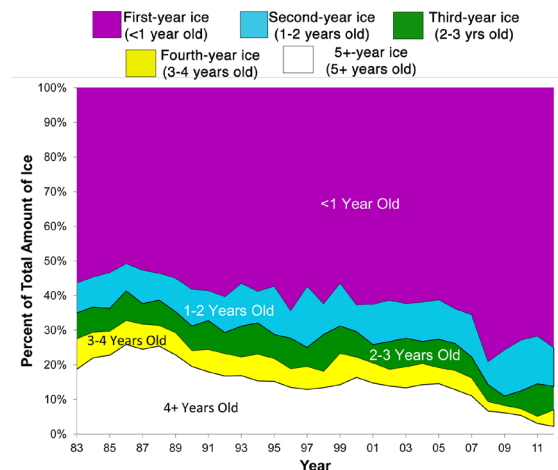
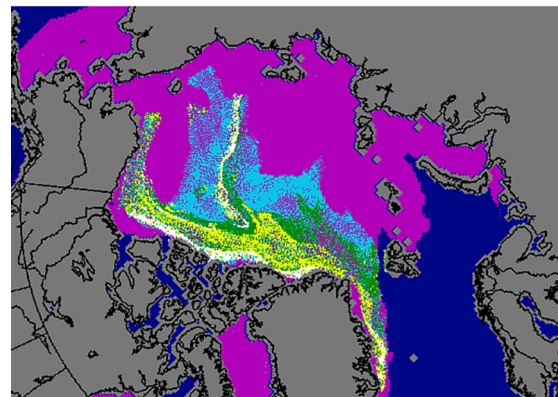
Oktobra 2011 se je ledeni pokrov začel hitro širiti, a se je trend nato umiril. Preostali del jeseni in pozimi je bil obseg ledu med najmanjšimi doslej in daleč pod dolgoletnim povprečjem. Od februarja dalje je bilo znatno več ledu kot običajno v Beringovem morju, medtem ko je med Grenlandijo in obalo Rusije vladal ogromen primanjkljaj. V marcu se je zaradi ugodnih vremenskih

razmer obseg približal dolgoletnemu povprečju in dosegel pozen maksimum, šele 18. dne v mesecu (slika 6). Kljub temu pa je bilo zaradi pomanjkanja starejšega, debelejšega ledu že jasno, da bo prihajajoči minimum spet globok (slika 7).



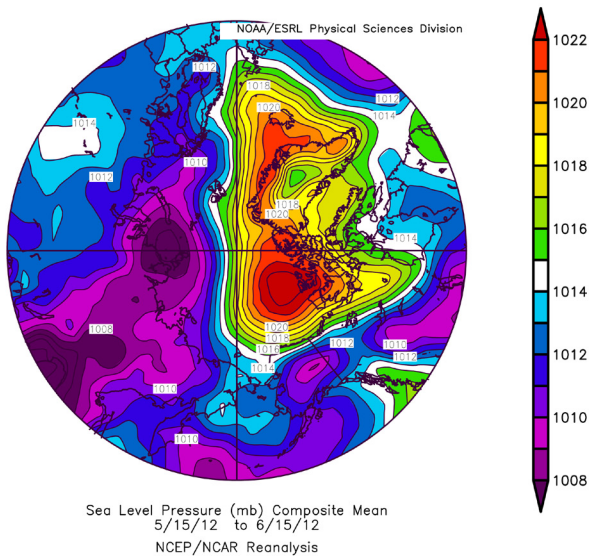
Slika 6. Obseg ledu v marcu 2012 (belo) in primerjava z mediano robu ledenega pokrova v obdobju 1979–2000. Vir: Državno središče za podnebne podatke (NSIDC)

### Arctic Sea Ice Age March 2012



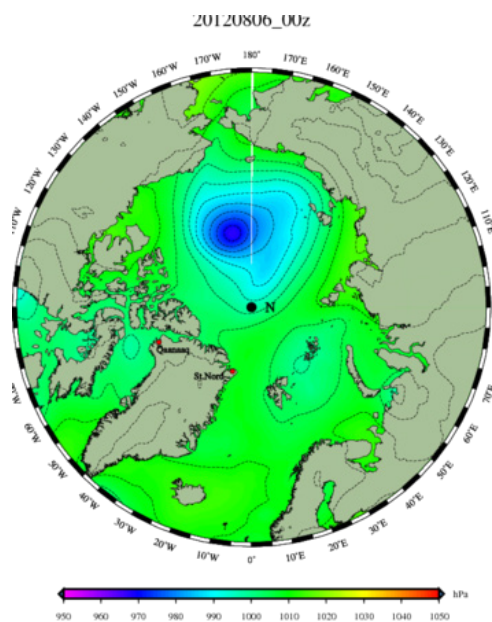
Slika 7. Karta in časovni potek porazdelitve starosti morskega ledu na Arktiki v mesecu marcu. V zadnjih desetletjih je delež dve in več let starega ledu upadel z okoli 35 % na vsega dobrih 10 % v zadnjih letih. Vir: NSIDC/J. Maslanik in M. Tschudi, Univerza v Koloradu

Aprilski obseg je bil še normalno velik, v maju že znatno podpovprečen, od sredine junija pa vseskozi blizu rekorda ali rekordno nizek. V drugi polovici maja in v prvi polovici junija je bilo vreme večinoma ugodno za hitro taljenje ledu – v Beaufortovem morju je prevladoval anticiklon, v morju Laptevov pa ciklon (slika 8).



Slika 8. Povprečni zračni tlak nad Arktiko od 15. maja do 15. junija 2012. Vrednosti so preračunane na morsko gladino. Vir: NOAA/ESRL Physical Sciences Division, Boulder, Colorado

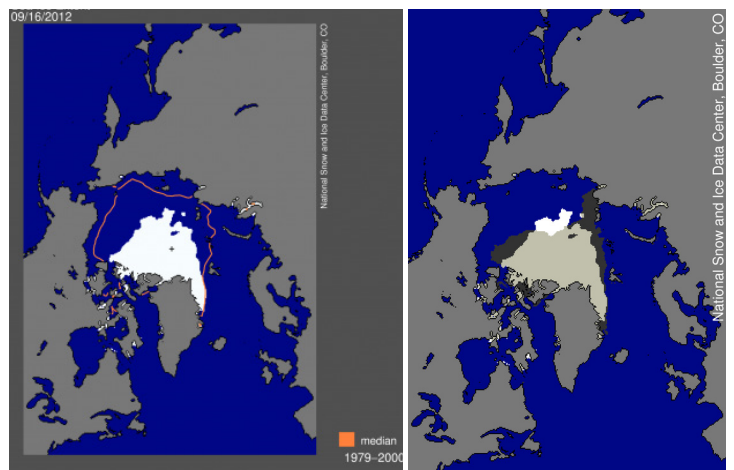
Dotok toplega zraka iznad vzhoda Azije, jasno vreme nad precejšnjim delom osrednje Arktike in odmikanje ledu od obal Aljaske in Sibirije so v juniju povzročili dramatičen padec tako v obsegu kot površini ledu. Podobne so bile vremenske razmere tudi v začetku julija, sicer je bilo večino meteorološkega poletja vreme spremenljivo, pogosto oblačno. Izstopajoč vremenski



Slika 9. Zračni tlak pri tleh nad Arktiko 6. avgusta 2012 zjutraj. Vir: Danski meteorološki inštitut

dogodek je bil le nenavadno globok ciklon, ki je 5. avgusta nastal nad obalo severovzhodne Sibirije. S središčnim pritiskom do vsega okoli 964 hPa (slika 9) se je pomaknil blizu severnega tečaja in tam počasi oslabil. V nadaljevanju avgusta in v prvi polovici septembra je sledilo spremenljivo vreme.

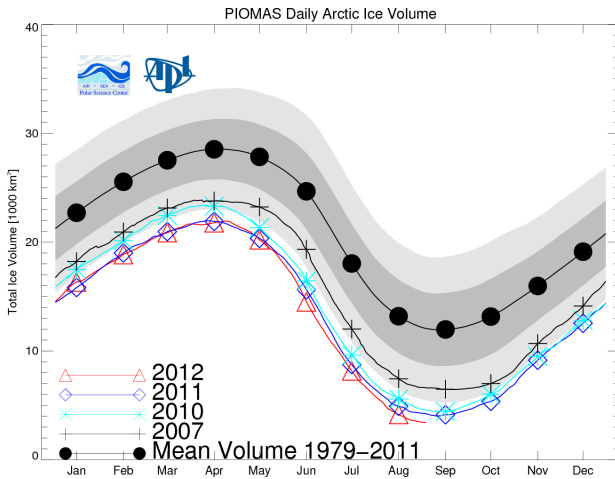
Že oslavljen ledeni pokrov je omenjeni avgustovski ciklon močno prizadel. Močni ciklonalni vetrovi so premešali debelo plast morske vode in hkrati na površje posesali toplejšo vodo iz globin. To je privedlo do nagle in popolne stalitve razbitih ledenih plošč na obsežnem območju v sibirskih morjih in naprej proti tečaju. S tem se je na široko odprla severna morska pot vzdolž obale Rusije. Kasneje se je z umikom ledu pri Deželi Franca Jožefa in Severni zemlji še razširila (slika 10). Tudi severno od Aljaske se je led umaknil izjemno daleč proti severu. Slovita severozahodna morska pot, ki jo je v začetku 20. stoletja prvi preplul Amundsen, se je, sodeč po satelitskih slikah, odprla v septembru.



Slika 10. Obseg morskega ledu na Arktiki 16. septembra 2012 (belo) in primerjava s »povprečnim« robom v obdobju 1979–2010 (oranžna krivulja, levo) in obsegom ob minimumu 2007 (sivo, desno). Vir: Državno središče za podnebne podatke (NSIDC)

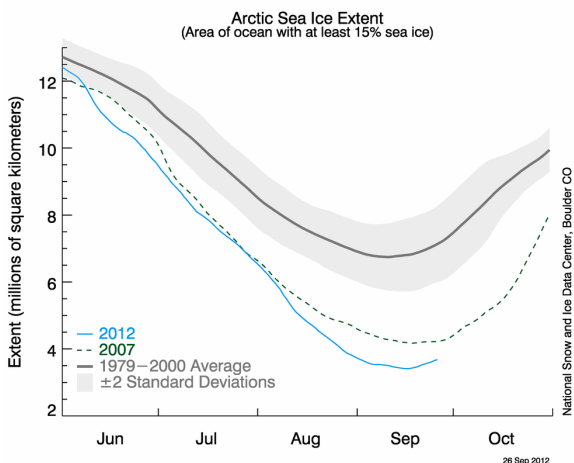
Po izračunih Univerze v Illinoisu je površina morskega ledu na Arktiki že 17. avgusta dosegla rekord leta 2011, 2,92 milijona km<sup>2</sup>. V naslednjih dveh tednih se je površina zmanjšala na 2,5 milijona km<sup>2</sup>. JAXA je o rekordno majhnem obsegu poročala 25. avgusta, saj je dan prej obseg dosegel 4,21 milijona km<sup>2</sup>, malce manj od prejšnjega rekorda 24. septembra 2007. NSIDC je novico o rekordnem obsegu objavil dva dni kasneje, ko je petdnevno povprečje obsega padlo na 4,10 milijona km<sup>2</sup> in s tem preseglu doslej rekordno znamko 4,17 milijona km<sup>2</sup> dne 18. septembra 2007. PSC je ob koncu avgusta objavil novo vrednost prostornine morskega ledu. Dne 25. avgusta je znašala 3500 km<sup>3</sup>, okoli 500 km<sup>3</sup> manj kot 10. septembra 2011, a še vedno znotraj negotovosti

modela PIOMAS. Do 2. septembra se je mesečna vrednost zmanjšala še za 100 km<sup>3</sup> in je bila le še dobro četrtino povprečne v obdobju 1979–2010 za ta letni čas (slika 11).



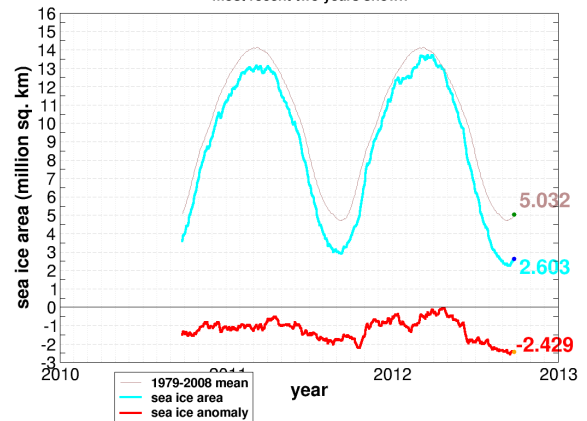
Slika 11. Letni hod prostornine arktičnega morskega ledu na podlagi izračunov modela PIOMAS. Meji sivega območja predstavljata en oziroma dva standardna odklona od povprečja v obdobju 1979–2011. V zadnjih treh letih je prostornina skozi vse leto daleč pod dolgoletnim povprečjem, a relativna sprememba je največja poleti. Vir: Univerza v Washingtonu, Laboratorij za aplicirano fiziko, Središče za polarno znanost (PSC)

Sredi septembra sta tako obseg kot površina dosegla minimum, ki je bil znatno nižji kot v preteklih letih in verjetno tudi najnižji v zadnjih stoletjih (slike 12–14).



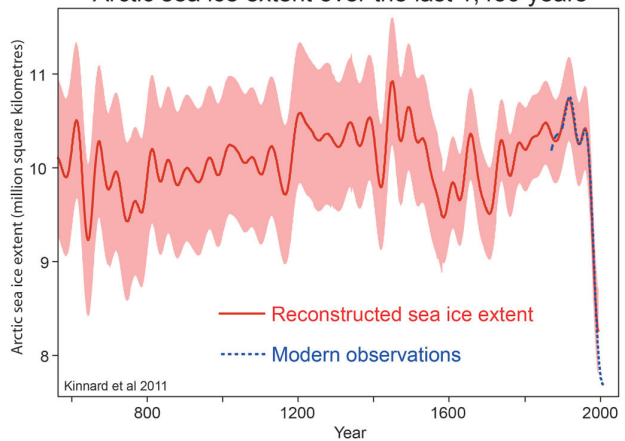
Slika 12. Časovni potek obsega ledu od junija do septembra v rekordnih letih 2007 in 2012 in primerjava s povprečjem referenčnega obdobja 1979–2000 (siva krivulja). Siv pas predstavlja vrednosti znotraj dveh standardnih odklonov referenčnega obdobja. Vir: Državno središče za podnebne podatke (NSIDC), stanje 26. septembra 2012

Current Northern Hemisphere Sea Ice Area  
most recent two years shown



Slika 13. Časovni potek površine ledu na severni polobli v lanskem in letošnjem letu (turkizna krivulja). S tanko krivuljo so prikazane povprečne razmere v obdobju 1979–2008 in v spodnjem delu grafa z rdečo krivuljo odklon letošnjega in lanskega leta od povprečnih razmer. Vir: Cryosphere Today, stanje 27. septembra 2012

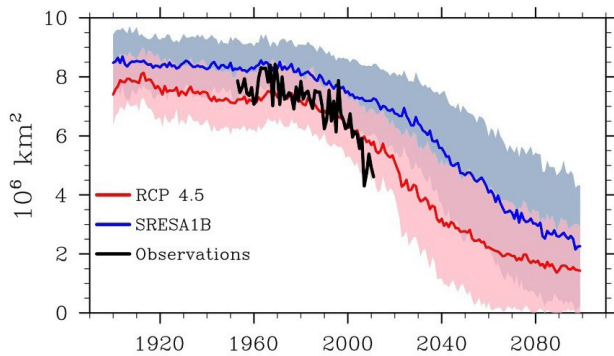
Arctic sea ice extent over the last 1,450 years



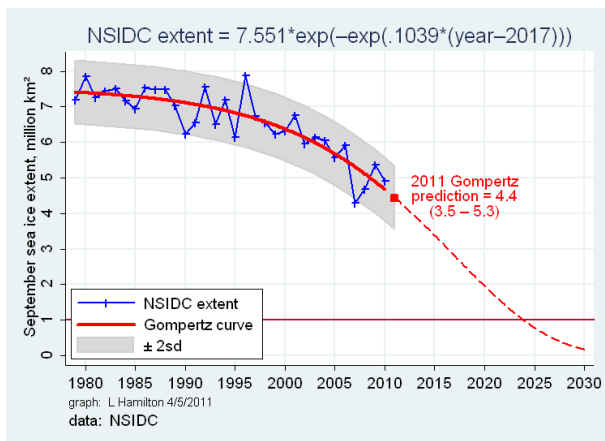
Slika 14. Rekonstruiran in izmerjen avgustovski obseg ledu v zadnjih 1450 letih. Predstavljen je glajen potek s 40-letnim filtrom, obarvano območje prikazuje negotovost rekonstrukcije. Vir: Kinnard in sod., 2011

## Prihodnost morskega ledu na severu

V prihodnosti lahko pričakujemo nadaljnje krčenje ledu v Severnem ledenem morju in že v nekaj letih, najpozneje pa v nekaj desetletjih bo ob koncu poletja ledu kvečjemu za vzorec. Napovedi, kdaj se bo to prvič zgodilo, se medsebojno bistveno razlikujejo, še posebej statistične na osnovi meritev in rezultati podnebnih modelov (sliki 15 in 16). V zimskem času bo Severno ledeno morje še vedno večinoma pod ledenim pokrovom, saj se bosta površina morja in ozračje kljub povečanemu učinku tople grede v dolgi polarni noči še vedno močno ohladila.



Slika 15. Izmerjen obseg arktičnega morskega ledu v septembru v obdobju 1952–2011, primerjava z izračuni podnebnih modelov v paketu CMIP3 ob upoštevanju emisijskega scenarija SRESA1B in podnebnih modelov v paketu CMIP5 na podlagi scenarija RCP 4.5. Obarvano območje predstavlja vrednosti znotraj enega standardnega odklona in odebeljeni črti povprečje modelskih izračunov. Rezultati nove generacije modelov (CMIP5) so bistveno bolje ujemajo z meritvami. Vir: NSIDC, Stroeve in sod., 2012

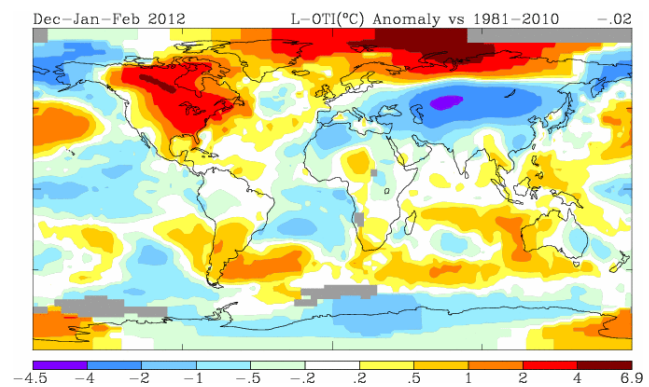
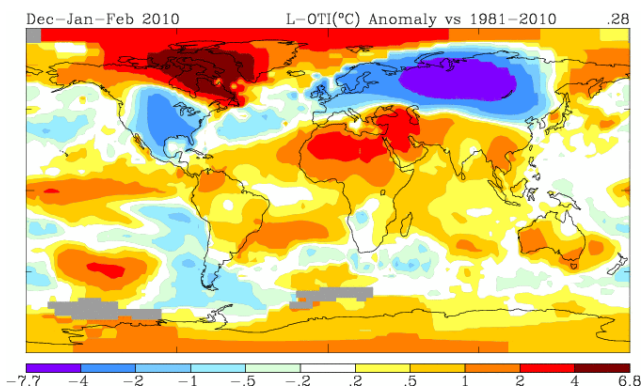


Slika 16. Primer napovedi septembrskega obsega morskega ledu na Arktiki na podlagi meritev in statističnega modela (Gompertzova krivulja). Vir: Arctic Sea Ice Blog

## Morski led in vreme pri nas

Raziskave v zadnjih letih kažejo, da ima krčenje ledenega pokrova Arktike znaten vpliv na vreme tudi v zmernih geografskih širinah. Območja, kjer se morski led spomladi ali poleti stali, vpijejo bistveno več sončnega obsevanja od zaledenelih območij, saj je morje temno, led pa svetel. To pripomore k pospešeni talitvi preostalega ledu, kar privede do pozitivne povratne zanke led-albedo. Jeseni se morje počasi ohlaja in oddaja toploto ozračju. Izhlapenje z gole morske površine je večje kot z ledenih plošč, kar privede do večje količine vodne pare v ozračju. S segrevanjem prizemne plasti ozračja se poveča zračni pritisk nad Arktiko in zmanjša temperaturna razlika med tečajem in ekvatorjem. Oboje oslabi polarni vrtinec in vetrni stržen visoko v ozračju. Mrzla polarna zračna masa tako pozimi lažje prodre v zmerne geografske širine. Valovi v splošnem zahodniku (Rossybjevi valovi), ki obkrožajo severno poloblo, se upočasnijo, njihova amplituda se poveča. Posamezni vremenski vzorci postanejo dolgotrajnejši, kar poveča verjetnost skrajnih vremenskih dogodkov.

V zadnjih letih smo bili priča ostremu mrazu in obilnemu sneženju v nekaterih delih severne poloble, kar sodi v okvir pričakovanih sprememb zaradi zmanjšanja morskega ledu na Arktiki: obilno sneženje in hud mraz na vzhodu ZDA, severu in zahodu Evrope v zimah 2009/10 in 2010/11 ter hud mraz v osrednji in vzhodni Evropi januarja in februarja 2012. Nasprotno je bila zima 2011/12 v ZDA zelo mila (slika 17). Naslednja leta bodo pokazala, koliko je k tem izrednim dogodkom dejansko prispevala sprememba količine ledu na severu. Zaenkrat zaradi prekratkega časovnega obdobja namreč omenjenih dogodkov še ne moremo neposredno povezati s spremembami morskega ledu.



Slika 17. Povprečni odklon v prizemni temperaturi zraka v zimah 2009/10 (levo) in 2011/12 (desno) glede na obdobje 1981–2010. Na severni polobli so v obeh zimah vidna obsežna območja z zelo velikim temperaturnim odklonom. Vir: NASA GISS

## Sklepne misli

Morski led na Arktiki je eden od ključnih in najbolj ranljivih delov podnebne sistema. Vse kaže, da arktično podnebje spreminja hitro in sočasno s površjem. Poleg dramatičnega zmanjševanja ledenega pokrova na morju se vse hitreje tali grenlandski led, sneg na kopnem pa se spomladi in poleti tali hitreje kot pred desetletji. Tudi zmanjševanje obsega permafrosta jasno kaže na podnebne spremembe na severu Zemljinega površja. Podnebni modeli so sicer že pred leti napovedovali umikanje ledu, a hkrati podcenili hitrost tega procesa. Prav mogoče je, da nas v naslednjih desetletjih čaka še kakšno neprijetno presenečenje, povezano s podnebnimi spremembami. Morda bo zmanjšanje ledu na Arktiki privedlo do nenadnih in obsežnih sprememb v splošni cirkulaciji ozračja daleč proti jugu ali pa se bo kakšen drug del podnebne sistema naglo odzval na vse večji poseg človeka v dokajšnje podnebno ravnovesje po zadnji ledeni dobi. Prav zato sta poleg rednega spremljanja podnebne sistema pomembna tudi zmanjševanje človekovega vpliva in pravočasno, učinkovito prilagajanje na prihajajoče podnebne spremembe.

## Povezave na strokovne spletne strani s podatki, analizami in novicami o morskem ledu na Arktiki:

- o NSIDC, <http://nsidc.org/>
- o Cryosphere Today, <http://arctic.atmos.uiuc.edu/cryosphere/>
- o PIOMAS <http://psc.apl.washington.edu/wordpress/research/projects/arctic-sea-ice-volume-anomaly/>
- o JAXA, [http://www.ijis.iarc.uaf.edu/en/home/seaice\\_extent.htm](http://www.ijis.iarc.uaf.edu/en/home/seaice_extent.htm)
- o DMI, <http://ocean.dmi.dk/arctic/icecover.uk.php>
- o Univerza v Bremnu, <http://iup.physik.uni-bremen.de:8084/amsr/amsre.html>
- o NASA Earth Data, <http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/subsets/?mosaic=Arctic>
- o NCDC, <http://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global-snow/>
- o Arctic Sea Ice Blog, <http://neven1.typepad.com/>
- o RealClimate, <http://www.realclimate.org/>
- o Open Mind, <http://tamino.wordpress.com/>

## Viri in literatura, uporabljeni v prispevku:

- <http://arctic.atmos.uiuc.edu/cryosphere/arctic.sea.ice.interactive.html>
- [http://en.wikipedia.org/wiki/Weather\\_satellite](http://en.wikipedia.org/wiki/Weather_satellite)
- <http://neven1.typepad.com/blog/2011/04/trends-in-arctic-sea-ice-extent.html>
- <http://nsidc.org/arcticseaicenews/2012/08/>
- <http://nsidc.org/arcticseaicenews/2012/08/arctic-sea-ice-breaks-2007-record-extent/>
- <http://nsidc.org/cryosphere/quickfacts/seaice.html>
- <http://nsidc.org/cryosphere/seaice/characteristics/multiyear.html>
- [http://nsidc.org/cryosphere/seaice/study/passive\\_remote\\_sensing.html](http://nsidc.org/cryosphere/seaice/study/passive_remote_sensing.html)
- <http://psc.apl.washington.edu/wordpress/research/projects/arctic-sea-ice-volume-anomaly/>
- <http://www.eorc.jaxa.jp/en/imgdata/topics/2012/tp120825.html>
- [http://www.ijis.iarc.uaf.edu/en/home/seaice\\_extent.htm](http://www.ijis.iarc.uaf.edu/en/home/seaice_extent.htm)
- <http://www.wetterzentrale.de/topkarten/fsavnnh.html>
- Kinnard, C., C. M. Zdanowicz, D. A. Fisher, E. Isaks-son, A. de Vernal, Lonnie G. Thompson, 2011. Reconstructed changes in Arctic sea ice over the past 1,450 years. *Nature* 479, 509–512 (23 November 2011), doi:10.1038/nature10581
- Stroeve, J. C., V. Kattsov, A. P. Barrett, M. C. Serreze, T. Pavlova, M. M. Holland in W. N. Meier, 2012. Trends in Arctic sea ice extent from CMIP5, CMIP3 and observations. *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2012GL052676, v tisku.
- Greene, C.H., in B.C. Monger. 2012. An Arctic wild card in the weather. *Oceanography* 25(2):7–9, <http://dx.doi.org/10.5670/oceanog.2012.58>.