

ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი  
ზუსტ და საბუნებისმეტყველო მეცნიერებათა ფაკულტეტი

დოქტორანტურის საგანმანათლებლო პროგრამა: გამოყენებითი ეკოლოგია

**გვანცა გვასალია**

*გლობალური კლიმატის ცვლილებების გავლენა პოლუსებზე*

სემინარი 2

სამეცნიერო ხელმძღვანელები: ასოც.პროფ. ლამზირა ლალიძე  
ასოც.პროფ.ავთანდილ ამირანაშვილი

თბილისი

2022

## შინაარსი

აქტუალობა.....	3
<b>თავი I.</b>	
1.1 ძირითადი მიმოხილვა.....	4
1.2 დედამიწის ენერჯის დისბალანსი (EEL).....	5
1.3 მსოფლიო ოკეანის საშუალო დონე (GMSL).....	6
1.4 თბილი (MHW) და ცივი (MCS) დინებები.....	8
<b>თავი II.</b>	
2.1 არქტიკა.....	10
2.2 არქტიკის ანომალიები.....	12
2.3 ანტარქტიდა.....	14
2.4 ანტარქტიდის ანომალიები .....	16
2.5 გრენლანდია და მისი ანომალიები.....	18
2.6 თოვლის საფარი ჩრდილოეთ ნახევარსფეროში.....	20
მიღებული შედეგები.....	21
დასკვნა.....	22
გამოყენებული ლიტერატურა.....	23

## აქტუალობა

თანამედროვე მსოფლიოში და მათ შორის საქართველოშიც ინტენსიურად მიმდინარეობს კლიმატის გლობალური ცვლილება. კლიმატის ცვლილების ტენდენცია განსაკუთრებით შეიმჩნევა გასული საუკუნის 70-იანი წლებიდან, როდესაც მსოფლიოში და მათ შორის საქართველოშიც, აღინიშნა ხშირი კლიმატური კატასტროფები. მეცნიერულად დადასტურდა, რომ კლიმატის ცვლილება პლანეტის მასშტაბით, ცალკეულ რეგიონში გამოიხატა საშუალო ტემპერატურის მატებით, მასთან დაკავშირებული ნალექების ინტენსივობის ზრდითა და ექსტრემალური მოვლენების სიხშირით. ცირკულაციური პროცესები განსაზღვრავენ ამინდის რეჟიმს და მისი ცვლილების ხასიათს, რის გამოც ის წარმოადგენს ერთ-ერთ კლიმატწარმომქმნელ ფაქტორს დედამიწის ზედაპირზე.

თანამედროვე მსოფლიოში კლიმატის ცვლილება აღიარებულია, როგორც ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი გამოწვევა. კლიმატი აქტობრივად გასაშუალოებული ამინდია, რომელიც მთლიანად დედამიწის ან კონკრეტული რეგიონის საშუალო ამინდის ხანგრძლივ ცვლილებას აღნიშნავს.

მთავარი მიზეზი, რის გამოც კაცობრიობა გლობალური კლიმატური ცვლილებების წინაშე დგას არის ადამიანის აქტიური საწარმოო საქმიანობა, რომელიც პირდაპირ უკავშირდება სწრაფ ინდუსტრიალიზაციას, შესაბამისად გლობალური კლიმატური ცვლილების საკითხი მუდმივად აქტუალურ და დიდი გამოწვევების საკითხად აღინიშნება. ასევე კლიმატის ცვლილება უკავშირდება ბუნებრივ ცვლილებებს, როგორც არის კონტინენტებისა და ოკეანეების ზომების ცვლა და მათი განლაგება, მზის ნათების ცვლილება, დედამიწის ორბიტის პარამეტრების შეცვლა, ატმოსფეროს გამჭვირვალობის შეცვლა, ატმოსფეროს სათბურის აირების კონცენტრაციის ცვლა ( $\text{CO}_2$  და  $\text{CH}_4$ ), ალბედოს ცვლილება, ოკეანის სიღრმეში სითბოს ცვლა და სხვა.

მყინვარები წარმოადგენენ მთავარი ინდიკატორს კლიმატის გლობალურ ცვლილებაში. დიდი ყურადღება ექცევა მყინვარებზე დაკვირვებას და მათ დინამიკას, რადგან კაცობრიობა დადგა იმ გლობალური საფრთხის წინაშე რასაც პოლუსებზე მყინვარის დნობა ჰქვია. სწორედ ამ ჭრილშია განხილული ნაშრომში, არქტიკის და ანტარქტიდის მყინვარების სივრცე-დროითი მსვლელობა და ანომალიები.

## თავი I

### 1.1 ზოგადი მიმოხილვა

2021-2022 წლებში, ძირითადი სათბურის გაზების: ნახშირორჟანგის, მეთანის და აზოტის ოქსიდის კონცენტრაციის მკვეთრი მატება აღინიშნა. 2020 წელს სათბურის გაზების ზრდის ტემპი აღემატებოდა ბოლო ათწლეულში დაფიქსირებულ საშუალო მაჩვენებელს, მიუხედავად საწვავის მოხმარებით გამოწვეული ემისიის 5,6%-ით ვარდნისა, რაც გამოწვეული იყო COVID-19 პანდემიასთან დაკავშირებულ შეზღუდვებთან.

2021 წელს (იანვრიდან-სექტემბრამდე) საშუალო ტემპერატურა დაახლოებით  $1,08 \pm 0,13$  °C-ით აღემატება 1850-1900 წლების საშუალო მაჩვენებელს.

მსოფლიო ოკეანის დონის სატელიტური სიღრმითი გაზომვები შედეგად დადასტურდა, რომ მსოფლიოში 2013-2021 წლებში ოკეანის დონე მატულობდა (4,4 მმ/წ). რეკორდულ მაჩვენებელს კი მიაღწია 2021 წელს.

ბოლო ორი ათწლეულის განმავლობაში, ოკეანის საშუალო ტემპერატურის მკვეთრი ზრდა აღინიშნა. 2021 წლის კრიოსფერული ცვლილებები შეესაბამებოდა ბოლო ათწლეულის ტენდენციებს, რაც გამოიხატება: ჩრდილოეთ ნახევარსფეროში თოვლის საფარის ნორმაზე დაბალი სიდიდით (გაზაფხულზე და ზაფხულის ბოლოს); არქტიკის ყინულის დნობით და გრელანდიის და ანტარქტიდის ყინულის მასის უარყოფითი მაჩვენებლით.

გრენლანდიამ განსაკუთრებული აზღავნა განიცადა აგვისტოს შუა რიცხვებში, სადაც ფიქსირდებოდა 0°C-ზე მაღალი ტემპერატურა ყინულის საფარის ყველაზე სქელ ყინულის ფენაში. ეს გახლდათ პირველი შემთხვევა მეოცე საუკუნის ისტორიაში.

ჩრდილოეთ ნახევარსფეროში, ზაფხულის მეორე ნახევარში ექსტრემალურად მაღალმა ტემპერატურამ დააზარალა ხმელთაშუა ზღვის რეგიონი. აგრომეტეოროლოგიურ სადგურზე ტემპერატურამ 2020 წელს მიაღწია  $48,8^{\circ}\text{C}$ -ს, რაც წარმოადგენს რეკორდულ ნიშნულს.

ჭარბი ენერჯიის უმეტეს ნაწილს, რომელიც გროვდება დედამიწის სისტემაში, სათბურის გაზების კონცენტრაციის გაზრდის გამო ოკეანე ითვისებს. დამატებითი ენერჯია ათბობს ოკეანეს და, შესაბამისად, წყლის თერმული გაფართოება იწვევს ზღვის დონის აწევას, რასაც ემატება ხმელეთის ყინულის მასის დნობა. ოკეანის ზედაპირული ფენები უფრო სწრაფად თბება, ვიდრე სიღრმეში, რაც გამოიხატება ზღვის ზედაპირის საშუალო ტემპერატურის მატებით და ასევე ტალღების ინტენსიობის გახშირებით. როგორც ატმოსფეროში CO<sub>2</sub>-ის კონცენტრაცია ასევე იზრდება ოკეანეში. ეს გავლენას ახდენს ოკეანის ქიმიურად, ამცირებს წყლის საშუალო pH-ს. ყველა ამ ცვლილებას აქვს ზემოქმედების ფართო სპექტრი ოკეანესა და სანაპირო რაიონებზე.

## 1.2. დედამიწის ენერჯის დისბალანსი (EEI)

CO<sub>2</sub>-ისა და სხვა სათბურის გაზების ემისიების ზრდა იწვევს დადებით რადიაციულ დისბალანსს ატმოსფეროს ზედა ნაწილში (EEI - დედამიწის ენერჯის დისბალანსი), რაც იწვევს ენერჯის დაგროვებას დედამიწის სისტემაში სითბოს სახით. ამ მიზეზებით ხდება გლობალურ დათბობა. დაგროვებული სითბოს დაახლოებით 90% აკუმულირდება ოკეანეში, რომელიც იზომება ოკეანის სითბოს შემცველობით (OHC).

1940-იანი წლებიდან ზღვებსა და ოკეანეებში ტემპერატურის გაზომვები ძირითადად ეყრდნობოდა გემის საზომ სისტემებს, რაც ზღუდავდა წყლის სიღრმეში ტემპერატურის დაკვირვების ხელმისაწვდომობას გლობალურ დონეზე.

2006 წელიდან უკვე შესაძლებელია ოკეანის სითბოს შემცველობის (OHC) ცვლილებების გაზომვა 2000მ სიღრმემდე, რომელიც შესაძლებელი გახდა მცურავი „არგოს“ ქსელის დახმარებით (რომელმაც პირველად მიაღწია თითქმის გლობალურ დაფარვას 2006 წელს). სხვადასხვა კვლევითმა ჯგუფებმა მოახდინა გლობალურად ოკეანის სითბოს შემცველობის (OHC-ის) შეფასებები, სადაც ყველა შედეგი აჩვენებს ოკეანის ტემპერატურის მატებას (სურ.1). განსხვავებები შეფასებებს შორის გამოიწვია მონაცემებში არსებულმა ხარვეზებმა, სხვადასხვა სტატისტიკური მასალების დამუშავების დროს.

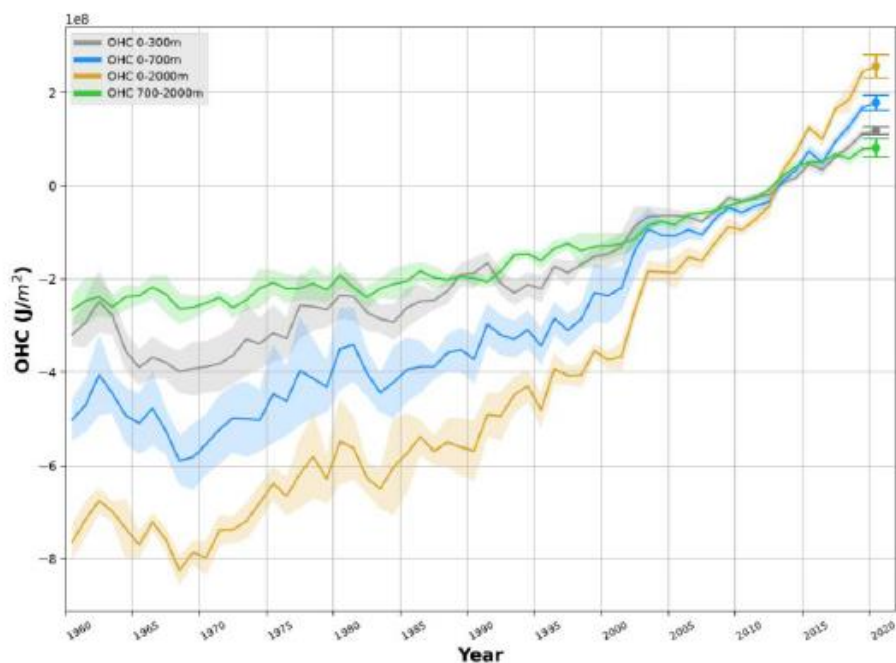


Figure 4: 1960-2020 ensemble mean time series and ensemble standard deviation (2-standard deviations, shaded) of global ocean heat content (OHC) anomalies relative to the 2005-2017 average for the 0-300m (grey), 0-700m (blue), 0-2000m (yellow) and 700-2000m depth layer (green). The ensemble mean is an outcome of a concerted international effort, and all products used are listed in von Schuckmann et al., 2020. Note that values are given for the ocean surface area between 60°S-60°N, and limited to the 300m bathymetry of each product. Updated from von Schuckmann et al. (2020). The ensemble mean OHC (0-2000m) anomaly (relative to the 1993-2020 average) has been added as a cross, together with its ensemble spread, and is based on the 7 products listed in Ocean heat content data.

2006 წლიდან ოკეანის ზედა 2000 მეტრიან ფენაში გაგრძელდა ტემპერატურის მატება და 2019 წელს მიაღწია ახალ რეკორდულ მაჩვენებელს, მოსალოდნელია, რომ იგი გაგრძელდება მომავალშიც. 2020 წელს დაფიქსირდა ტემპერატურის მატების რეკორდული მაჩვენებელი. ოკეანის დათბობის ტემპი განსაკუთრებით მკვეთრად გაიზარდა ბოლო ორი ათწლეულის განმავლობაში. 2006-2020 წლებში, 0-2000 მ სიღრმის ფენაში ოკეანის დათბობის მაჩვენებელმა მიაღწია  $1.0(0.6) \pm 0.1^{\circ}/\text{მ}^2$ , ხოლო 700 მ ფენაში კი შეადგენს  $0.6(0.4) \pm 0.1^{\circ}/\text{მ}^2$ . 1991-2018 წლებიდან 2000 მ სიღრმის ქვემოთ შეინიშნებოდა ოკეანეში ტემპერატურის მატება, თუმცა დაბალი სიჩქარით  $0,07 \pm 0,04 \text{ მ}^2$ .

### 1.3 მსოფლიო ოკეანის საშუალო დონე (GMSL)

მსოფლიო ოკეანის საშუალო დონე (GMSL), არის გლობალური კლიმატის ერთ-ერთი მთავარი მაჩვენებელი. იგი აერთიანებს კლიმატის სისტემის ბევრ კომპონენტში მომხდარ ცვლილებებს; მსოფლიო ოკეანის საშუალო დონის(GMSL) ცვლილებები გამოწვეულია ოკეანის ტემპერატურის მატებით, ზღვის წყლის თერმული გაფართოებით და ხმელეთის ყინულის დნობით. 1990-იანი წლების დასაწყისიდან კერძოდ, 1993-დან

2002 წლამდე, მაღალი სიზუსტის თანამგზავრებით გაზომილი, მსოფლიო ოკეანის დონის(GMSL საშუალო სიდიდე იყო 2.1 მმ წ<sup>-1</sup>, ხოლო 2013-დან 2021 წლამდე 4.4 მმ წ<sup>-1</sup>, რაც ძირითადად გაპირობებული იყო ყინულის მასის დაჩქარებული აბლაციით. 2021 წელს GMSL-მა მიაღწია ახალ რეკორდს და 2021 წელი აღინიშნა მსოფლიო ოკეანის საშუალო დონის ზრდა (სურ.2).

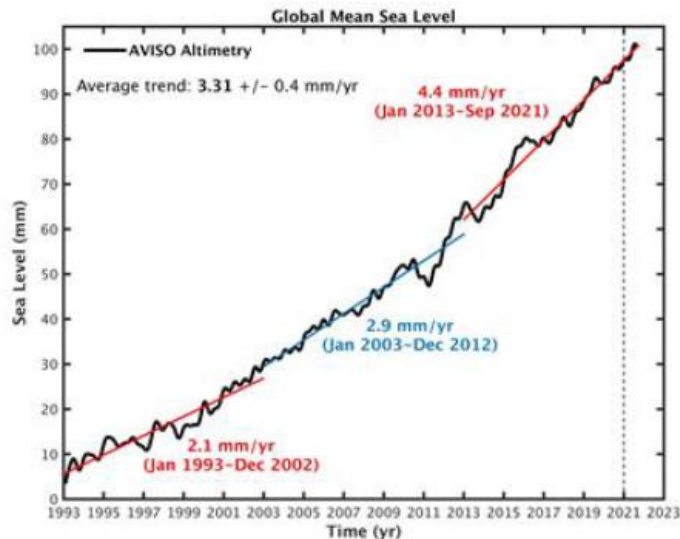


Figure 5: Global mean sea level evolution from January 1993 to September 2021 (black curve) based on high precision satellite altimetry. The coloured straight lines represent the average linear trend over 3 successive time spans (January 1993-December 2002; January 2003-December 2012; January 2013-September 2021). The thin vertical dashed line separates 2021 from previous years. Data source: AVISO altimetry (<https://www.aviso.altimetry.fr>)

მიუხედავად იმისა, რომ 1993 წლიდან მსოფლიო ოკეანის დონე გაიზარდა, ზღვის დონე ყველგან ერთნაირად არ აწეულა. ზღვის დონის რეგიონალური ცვლილებები აღინიშნა ოკეანის სითბოს შემცველობისა და მარილიანობის ადგილობრივი ცვლილებებით. რამდენიმე რეგიონი კვლავ განიცდის დონის მატებას გლობალურ საშუალო სიდიდეზე უფრო სწრაფად. სურ.3-ზე წარმოდგენილია განსხვავება ზღვის ადგილობრივ და გლობალურ დონეს შორის. ეს განსაკუთრებით ეხება დასავლეთ ტროპიკულ წყნარ ოკეანეს, აღმოსავლეთ ფილიპინებს და ახალი გვინეას, სამხრეთ-დასავლეთით წყნარ ოკეანეს, აღმოსავლეთ ავსტრალიას და ახალი ზელანდიას, ჩრდილოეთ წყნარი ოკეანეს, სამხრეთ-დასავლეთ ინდოეთის ოკეანეს. სხვადასხვა რეგიონებში, ადგილობრივი ზღვის დონე უფრო ნელა გაიზარდა, ვიდრე გლობალური საშუალო. მაგალითად, გრენლანდიისა და ისლანდიის სამხრეთით და სამხრეთ ოკეანეში ანტარქტიდის გარშემო.

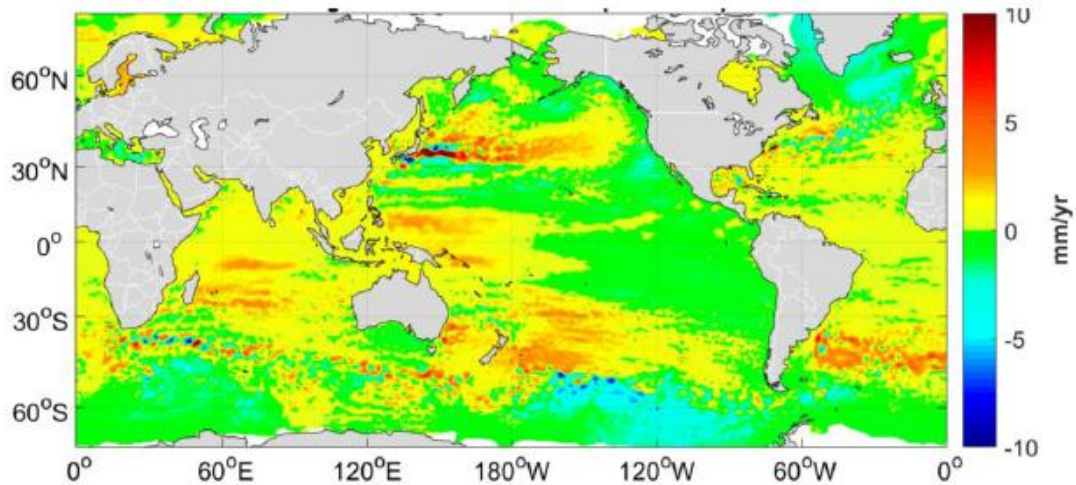


Figure 6: Regional trend patterns in sea level after the global mean trend has been removed, over 1993-2020 based on satellite altimetry. Unit: mm/yr. Data source: Copernicus Climate Change Service (<https://climate.copernicus.eu>). Note that the actual sea level has increased almost everywhere.

#### 1.4. თბილი (MHW) და ცივი (MCS) დინებები

ხმელეთზე სიციხისა და სიცივის ანალოგიურად, ოკეანური თბილი (MHW) და ცივი (MCS) დინებები წარმოადგენენ ექსტრემალური სიციხის ან სიცივის გამახანგრძლივებულ კომპონენტებს, რომლებიც გავლენას ახდენენ ოკეანის ზედაპირულ ფენაზე. მათ შეიძლება ჰქონდეთ მთელი რიგი შედეგები ზღვის მობინადრეებზე. ამჟამად სატელიტური დაკვირვებები გამოიყენება ზღვის ზედაპირის ტემპერატურის, თბილი (MHW) და ცივი (MCS) დინებების მონიტორინგისთვის, რომლებიც კლასიფიცირდება როგორც, ზომიერი, ძლიერი, მძიმე ან უკიდურესად მძიმე მაჩვენებლებისთვის.

თბილმა (MHW) დინებებმა 2021 წელს (14 ოქტომბრამდე) აჩვენეს საშუალო დღიური დაფარვა 13%, რაც ნაკლებია რეკორდულზე (17% -2016 წელს და 16% - 2020 წელს). MHW-ების თითქმის 25% იყო კლასიფიცირებული როგორც „ძლიერი“; 25% როგორც „ზომიერი“ დინებები. ოკეანის ზედაპირის 55%-მა განიცადა მინიმუმ ერთი MHW- 2021 წლის განმავლობაში, 2020 წელს კი 63%-ზე ნაკლები (სურ.4).



MHW categories of 2021 (so far)  
 NOAA OISST; Climatology period: 1982-2011

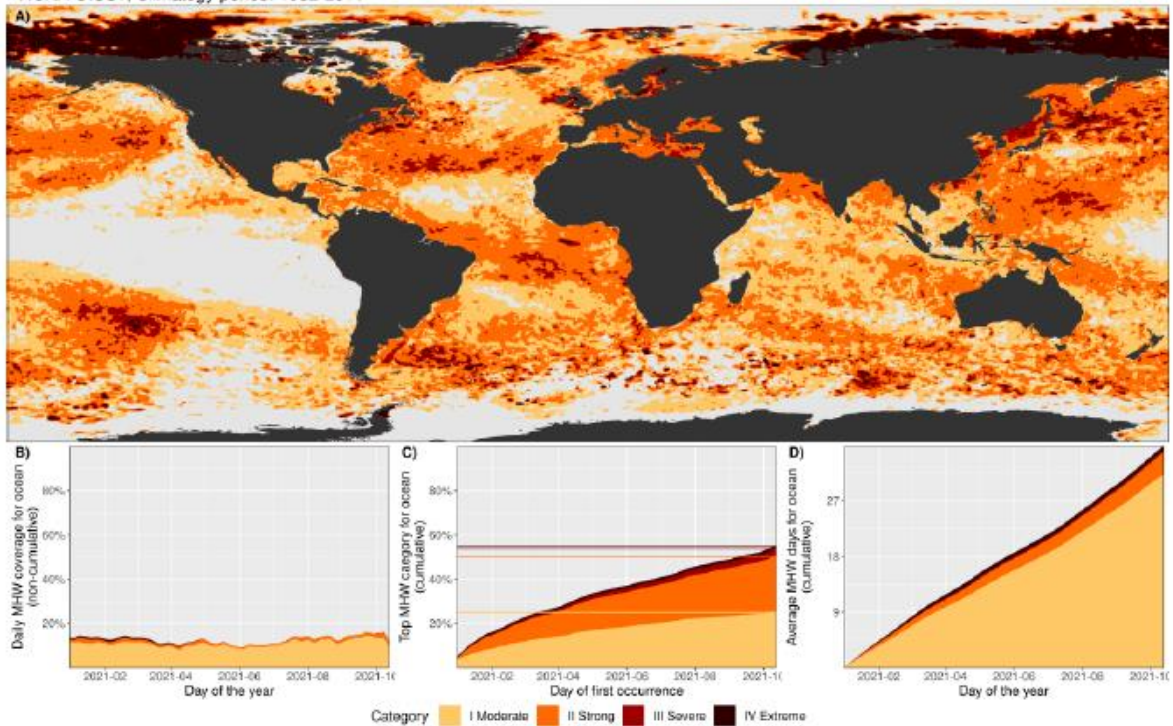


Figure 7: (a) Global map showing the highest MHW category (for definitions, see Marine heatwave and marine cold spell data) experienced at each pixel from 1 January to 14 October 2021 (reference period 1982–2011). Light grey indicates that no MHW occurred in a pixel over the entire year; (b) Stacked bar plot showing the percentage of the surface of the ocean experiencing an MHW on any given day of the year; (c) Stacked bar plot showing the cumulative percentage of the surface of the ocean that experienced an MHW over the year. Note: These values are based on when in the year a pixel first experienced its highest MHW category, so no pixel is counted twice. Horizontal lines in this figure show the final percentages for each category of MHW; (d) Stacked bar plot showing the cumulative number of MHW days averaged over the surface of the ocean. Note: This average is calculated by dividing the cumulative sum of MHW days per pixel weighted by the surface area of those pixels. Data are from NOAA OISST. Source: Robert Schlegel

MCS categories of 2021 (so far)  
 NOAA OISST; Climatology period: 1982-2011

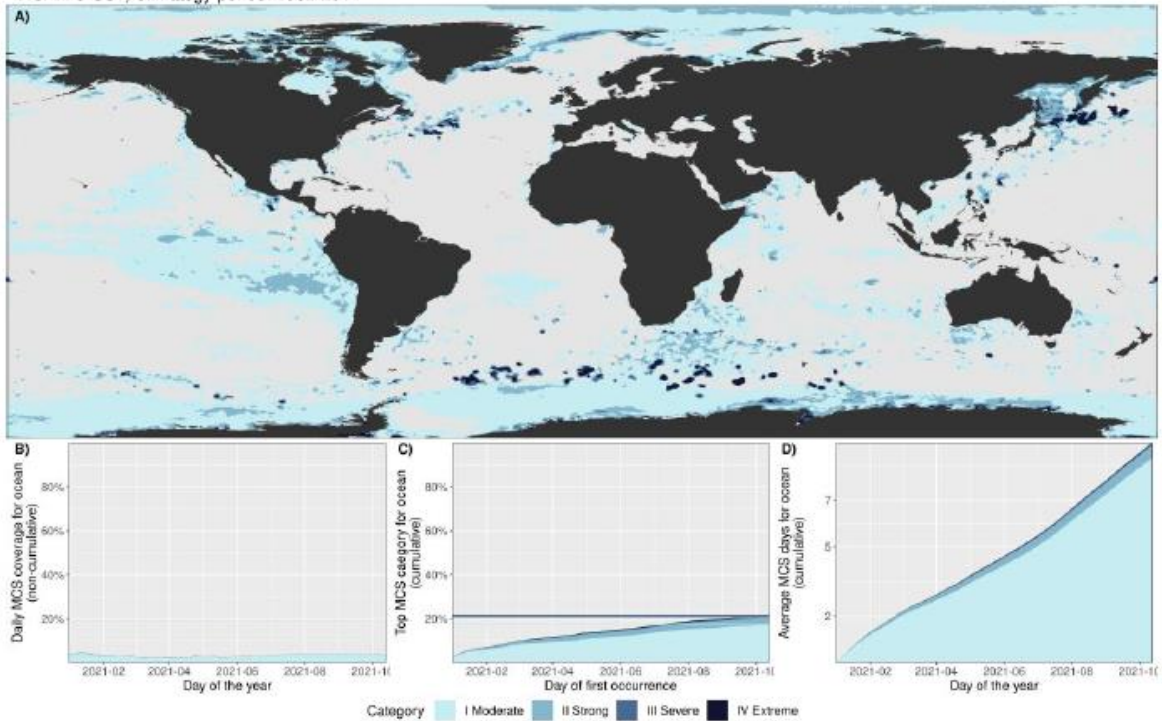


Figure 8: as for Figure 7 but showing Marine Cold Spells rather than Marine Heat Waves. Data are from NOAA OISST. Source: Robert Schlegel

## თავი II

### 2.1 არქტიკა

არქტიკა არის კანადის, ფინეთის, გრენლანდიის, ისლანდიის, ნორვეგიის, რუსეთის, შვედეთის და ამერიკის შეერთებული შტატების მფლობელობაში, (ფართობი- 27 მლნ. კმ<sup>2</sup>).

არქტიკის იანვრის საშუალო ტემპერატურა მერყეობს დაახლოებით -40-დან 0°C-მდე (-40-დან 32°F), ხოლო ზამთრის ტემპერატურამ არქტიკის დიდ ნაწილში შეიძლება დაიწიოს -50°C-ის (-58 °F) ქვემოთ. ივლისის საშუალო ტემპერატურა დაახლოებით -10-დან 10°C-მდე (14-დან 50°F-მდე) მერყეობს, ზოგიერთ ადგილზე კი ზაფხულში დაახლოებით 30°C (86°F) ფიქსირდება.

2020-2021 წლებში არქტიკაში ზამთარში დაფიქსირდა ანომალიურად მაღალი წნევა. არქტიკაში ყინულის მაქსიმალური მოცულობა წლის განმავლობაში დაფიქსირდა 21 მარტს 14,8 მლნ კმ<sup>2</sup>. 2021 წლის მარტი იყო რიგით მე-9 და მე-10 ყველაზე დაბალი

მაჩვენებელი (1979-2021წწ.) მონაცემთა ბაზაში. ყინულის მოცულობა ძალიან სწრაფად შემცირდა ივნისში და ივლისის დასაწყისში ლაპტევის ზღვისა და აღმოსავლეთ გრენლანდიის ზღვის რეგიონებში. შედეგად, არქტიკის ტერიტორიაზე ყინულის ფართობი რეკორდულად დაბალი იყო ივლისის პირველ ნახევარში. ივლისის თვის საშუალო სიდიდეები იყო მე-2-დან მე-4 ყველაზე დაბალი რეკორდული მაჩვენებელი (რაც შეესაბამებოდა 2012 და 2019 წლებს). 2021 წელს ყინულის საფარის მინიმალური ფართობი დაფიქსირდა 16 სექტემბერს 4,72 მილიონი კმ<sup>2</sup>, ხოლო სექტემბერში ყინულის ფენის საშუალო ფართობი იყო 4,92 მილიონი კმ<sup>2</sup>, რაც მნიშვნელოვნად ჩამორჩება 1981-2010 წლების საშუალო მაჩვენებელს (სურ.5.)

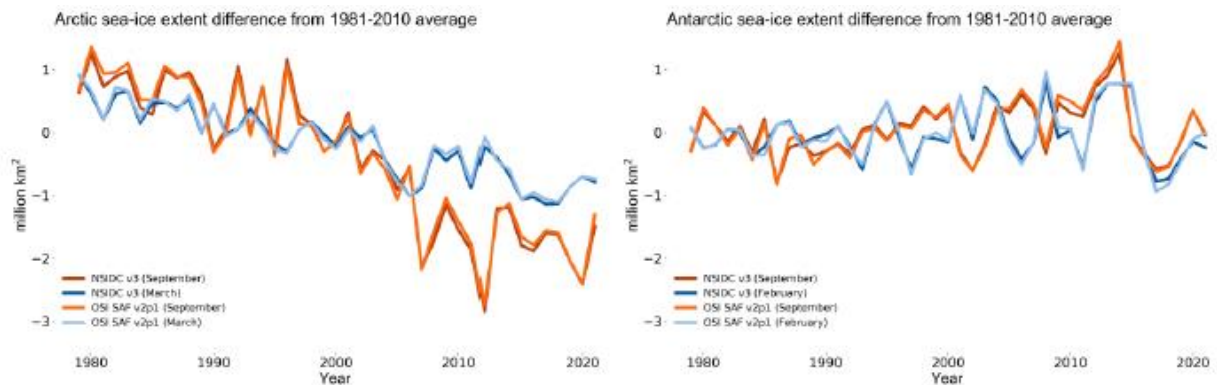


Figure 11: Sea-ice extent difference from the 1981–2010 average in the Arctic (left) and Antarctic (right) for the months with maximum ice cover (Arctic: March; Antarctic: September) and minimum ice cover (Arctic: September; Antarctic: February). Source: Data from EUMETSAT OSI SAF v2p1 and National Snow and Ice Data Centre (NSIDC) v3 (Fetterer et al., 2017) (see reference details in Sea-ice data).

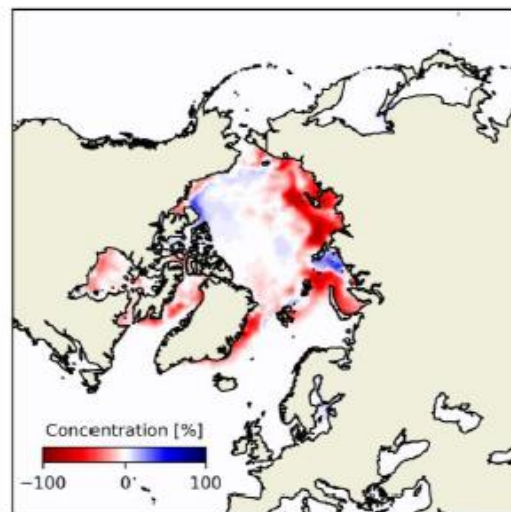
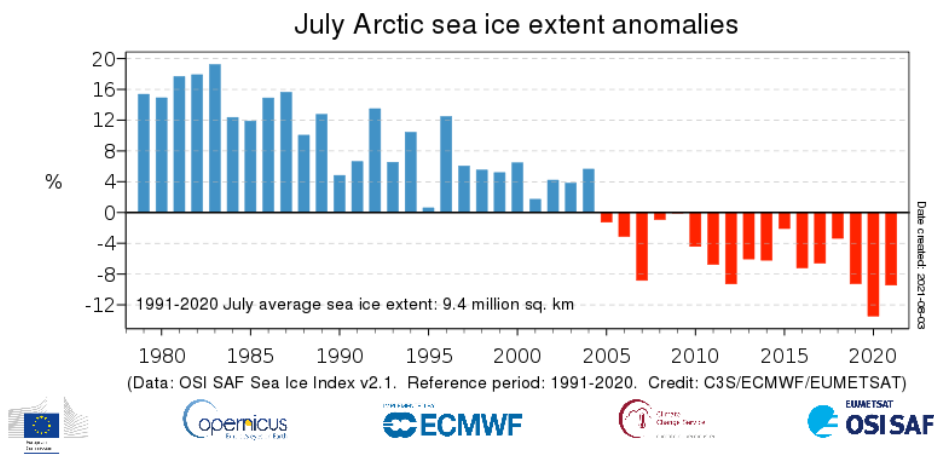


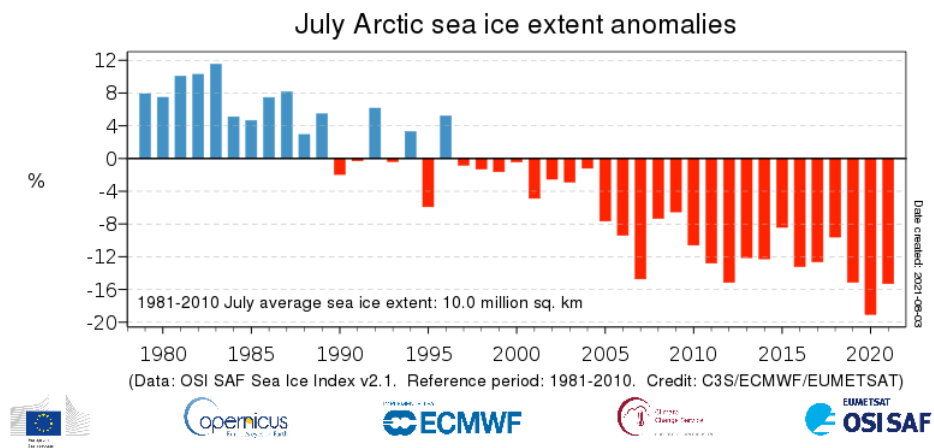
Figure 12: Arctic sea-ice concentration anomaly for July 2021 (difference from the 1981-2010 average). Red represents areas with less ice than normal, blue means more ice. Source: EUMETSAT OSI SAF data with research and development input from ESA CCI.

## 2.2 არქტიკის ანომალიები

2021 წლის მაისში არქტიკული ყინულის ფენის (საშუალო თვიური) ფართობი იყო 12,6 მილიონი კმ<sup>2</sup> ე.ი. 0,2 მილიონი კმ<sup>2</sup>-ით (2%) ნაკლები, ვიდრე 1991-2020 მაისში. მიუხედავად იმისა, რომ ეს სიდიდე საშუალოზე დაბალია, ის აშკარად აღემატება მაისისთვის სიდიდებს, რომლებიც დაფიქსირდა 2014 - 2020 წწ (სურ.7).



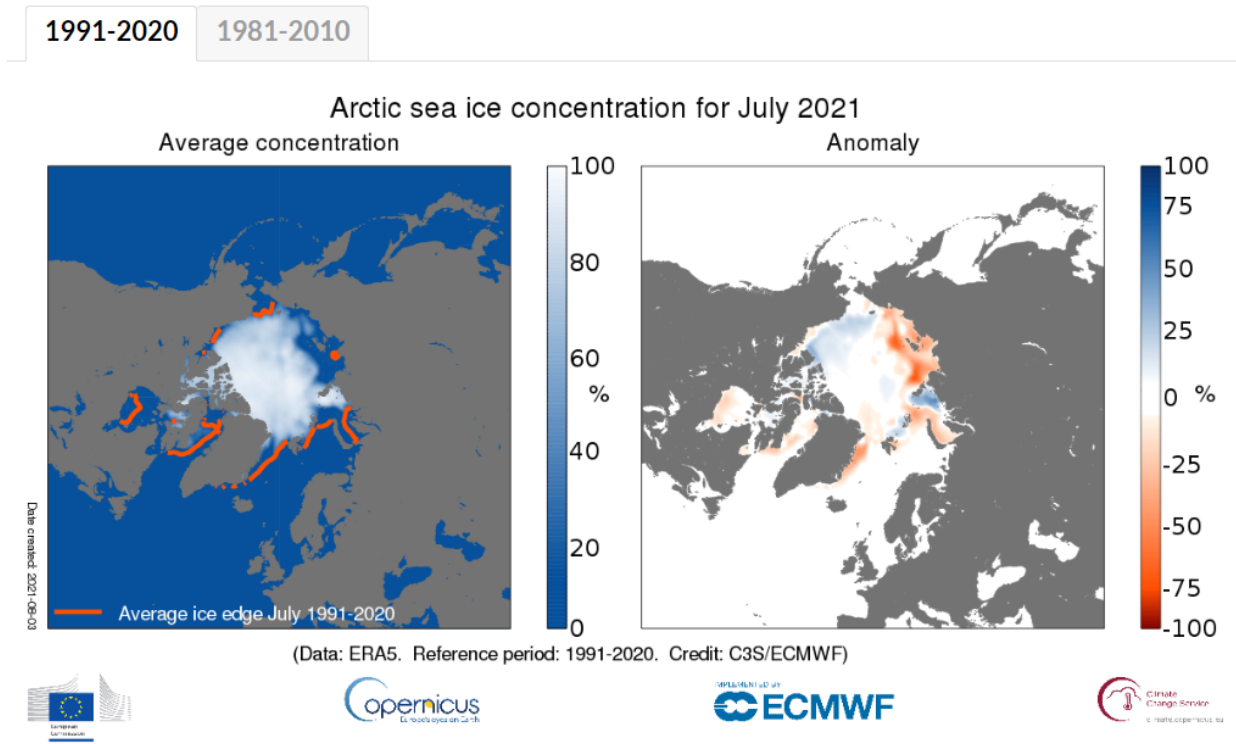
Time series of monthly mean Arctic sea ice extent anomalies for all July months from 1979 to 2021. The anomalies are expressed as a percentage of the July average for the period 1991-2020. Data source: EUMETSAT OSI SAF Sea Ice Index v2.1. Credit: Copernicus Climate Change Service/ECMWF/EUMETSAT.



Time series of monthly mean Arctic sea ice extent anomalies for all July months from 1979 to 2021. The anomalies are expressed as a percentage of the July average for the period 1981-2010. Data source: EUMETSAT OSI SAF Sea Ice Index v2.1. Credit: Copernicus Climate Change Service/ECMWF/EUMETSAT.

მაისში არქტიკული ზღვის ყინულის დნობა გრძელდება. ყინულის კონცენტრაციის ანომალიების რუკა არქტიკის რეგიონში 2021 წლის მაისისთვის აჩვენებს, რომ ზოგადად ანომალიები არც თუ ისე დიდი იყო. მიუხედავად იმისა, რომ დომინირებდა საშუალოზე დაბალი ანომალიები. კერძოდ საშუალოზე დაბალი ანომალიები დაფიქსირდა არქტიკის ირგვლივ, ლაბრადორისა და ჩრდილოეთ ბარენცის ზღვაში.

სურ.8. მარცხნივ: სქელი ნარინჯისფერი ხაზი აღნიშნავს კლიმატოლოგიურ ზღვის ყინულის ზღვარს მაისისთვის 1991-2020 წწ. მარჯვნივ: არქტიკული ზღვის ყინულის კონცენტრაციის ანომალიები 2021 წლის მაისისთვის, მაისის საშუალო მაჩვენებელთან შედარებით 1991-2020 წწ .



Left: Average Arctic sea ice concentration for July 2021. The thick orange line denotes the climatological sea ice edge for July for the period 1991-2020. Right: Arctic sea ice concentration anomalies for July 2021 relative to the July average for the period 1991-2020. Data source: ERA5. Credit: Copernicus Climate Change Service/ECMWF.

### 2.3. ანტარქტიდა

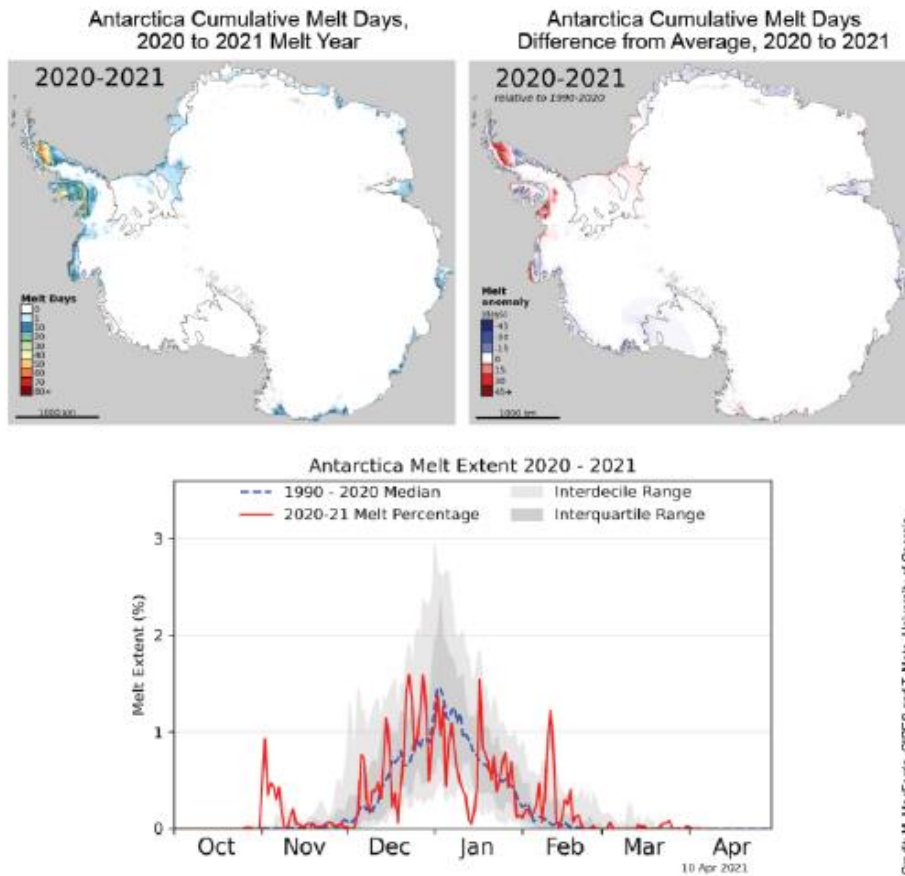
ანტარქტიდის კლიმატი დედამიწაზე ყველაზე ცივია. ანტარქტიდაზე დაფიქსირებულია ჩვენს პლანეტაზე ყველაზე დაბალი ბუნებრივი ტემპერატურა  $-89.2^{\circ}\text{C}$  ( $-128.6^{\circ}\text{F}$ ) სადგური ვოსტოკი. ის ასევე ძალიან მშრალია (ფაქტობრივად ყინულის უდაბნოა), საშუალოდ 166 მილიმეტრი (6.5 ინჩი) ნალექი მოდის წელიწადში, რადგან წვიმა იშვიათად აღწევს კონტინენტის შიდა ნაწილში. ზამთრის თვეების (ივნისი, ივლისი, აგვისტო) საშუალო ტემპერატურაა იცვლება  $-60^{\circ}\text{C}$ -დან  $-70^{\circ}\text{C}$ -მდე, ზაფხულში (დეკემბერი, იანვარი, თებერვალი)  $-30^{\circ}\text{C}$ -დან  $-50^{\circ}\text{C}$ -მდე; სანაპიროზე ზამთარში  $-8^{\circ}\text{C}$ -დან  $-35^{\circ}\text{C}$ -მდე, ზაფხულში  $0-5^{\circ}\text{C}$ -მდე. კონტინენტის ფართობია დაახლოებით 14,107,000 კმ<sup>2</sup> (აქედან ყინულის ფენები, შრეები - 930,000 კმ<sup>2</sup>, კუნძულები - 75,500 კმ<sup>2</sup>).

2021 წლის განმავლობაში ყინულის ფენის მინიმალური სიდიდე დაფიქსირდა 19 თებერვალს, როდესაც ზღვის ყინულმა დაფარა 2,6 მილიონი კმ<sup>2</sup>, რაც ყველაზე დაბალი რეკორდული სიდიდეა 1979 წლიდან დღემდე. 1990-იანი წლების დასაწყისში ყინულის ფართობმა დაიწყო ზრდა და 2013 წელს მიაღწია მაქსიმუმს - 3,68 მილიონ კმ<sup>2</sup>-ს. მანამდე კი 2017 წელს მკვეთრად დაეცა 2,08 მილიონ კმ<sup>2</sup>-მდე, რაც ყინულის ფენის ფართობის ყველაზე დაბალი სიდიდეა. ხოლო 2018 წლიდან ყინულის ფენის წლიური მინიმუმის რაოდენობა თანდათანობით გაიზარდა.

2021 წლის 30 აგვისტოს ანტარქტიდის ზღვის ყინულმა მიაღწია თავის მაქსიმალურ წლიურ ზომას 18,80 მილიონი კმ<sup>2</sup>. თუმცა, ეს იყო მე-2 ყველაზე ადრეული მაქსიმუმი, რომელიც დაფიქსირდა 2016 წლის აგვისტოს მაქსიმუმის შემდგომ.

ანტარქტიდის ყინულის საფარი ამჟამად განიცდის უმნიშვნელო ზედაპირულ დნობას, გრენლანდიასთან შედარებით. 2021 წლის ზაფხულის ყინულის დნობის სეზონი ანტარქტიდაში ზომიერი იყო. 2020 წლის დეკემბრის შუა რიცხვებში ჩრდილოეთ ფილხნერის ყინულის შელფმა უედელის ზღვაში განიცადა ძლიერი, მაგრამ ხანმოკლე დნობის პროცესი. ზაფხულის დნობის სეზონი ანტარქტიდაში დასრულდა 2021 წლის თებერვლის შუა რიცხვებში. წლის ყველაზე ძლიერი დადებითი დნობის ანომალიები იყო ანტარქტიდის ნახევარკუნძულზე; სხვა ლოკაციების უმეტესობამ განიცადა თითქმის ნორმალური დნობის პროცესი 1990-2020 წლების საშუალო პირობებთან შედარებით.

2021 წლის ზაფხულში ანტარქტიდაში ყინულის ფენის თითქმის ნორმალური დნობის მიუხედავად, GRACE-FO თანამგზავრის გრავიტაციული მონაცემები აფიქსირებს, რომ ანტარქტიდის ყინულის ფენა აგრძელებდა ყინულის მასის შემცირებას 2021 წლის დასაწყისში. ანტარქტიდის ყინულის მასის შემცირება 2010 წლიდან ძირითადად გაპირობებულია ტუაიტსის მყინვარის ფენის გათხელებით, რაც გამოწვეულია ყინულის ამ სექტორში ოკეანის დათბობით (სურ.9).



Credit: M. MacFerrin, CIRES and T. Mote, University of Georgia

Figure 17: The 2021 melt season on the Antarctic Ice Sheet. Images courtesy of Michael MacFerrin and Thomas Mote, available from the NSIDC.

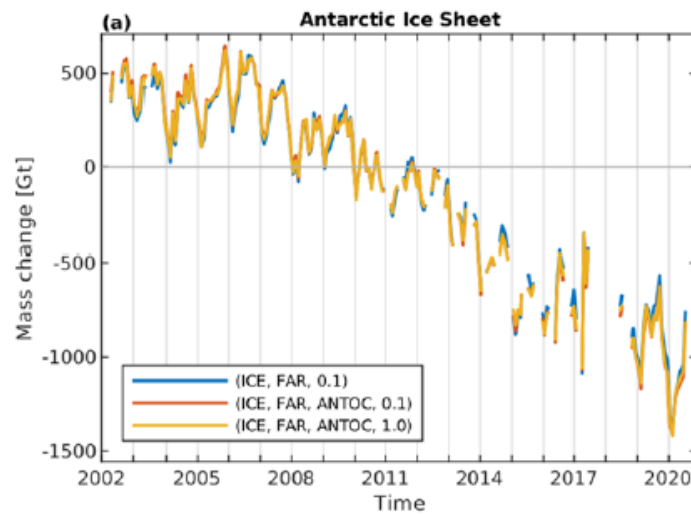
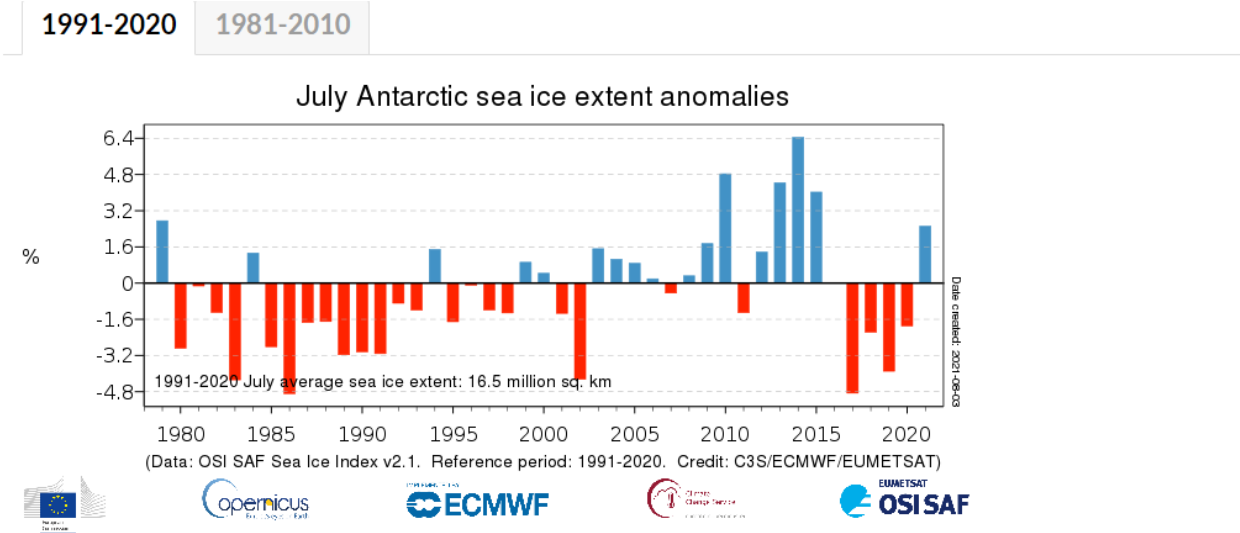


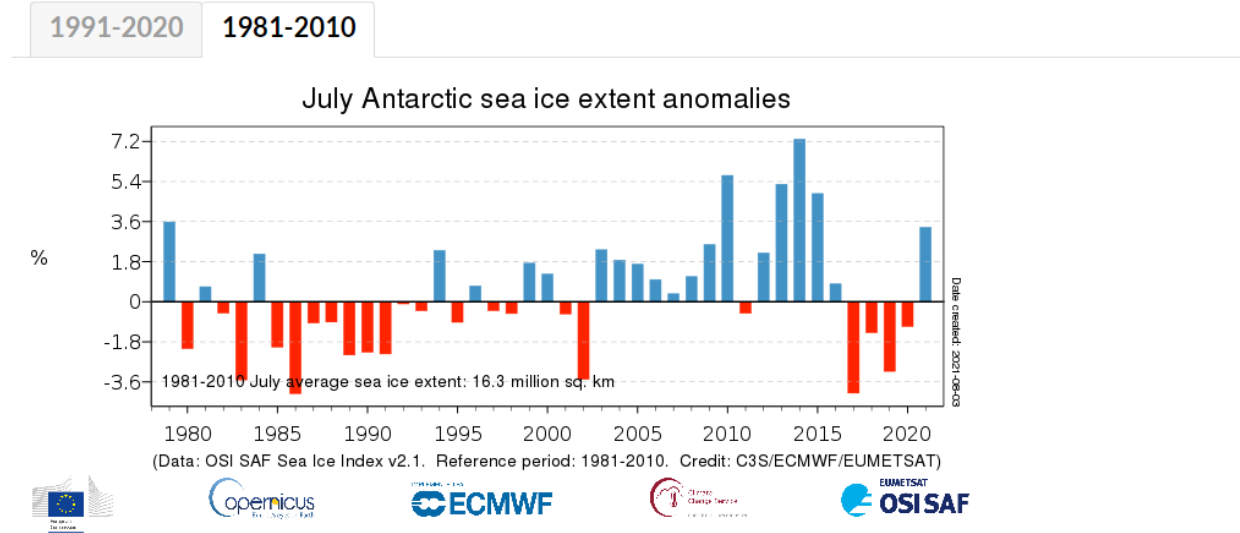
Figure 18: Antarctic Ice Sheet mass change measured by the GRACE and GRACE-FO satellite gravity missions, 2002-2021. The lines indicate different interpretations of the GRACE data (Groh and Horwath, 2021)<sup>46</sup>.

## 2.4 ანტარქტიდის ანომალიები

2021 წლის მაისში, ანტარქტიდის ზღვის ყინულის ფართობი ძალიან ახლოს იყო 1991-2020 წლების საშუალო მაჩვენებელთან, საშუალოდ 10,4 მილიონი კმ<sup>2</sup>, რაც მაისის საშუალო მაჩვენებელს 0,1 მილიონ კმ<sup>2</sup>-ით ჩამორჩება (სურ.10).



Time series of monthly mean Antarctic sea ice extent anomalies for all July months from 1979 to 2021. The anomalies are expressed as a percentage of the July average for the period 1991-2020. Note that the value for July 2016 is very close to zero, which is why it is not visible in the plot. Data source: EUMETSAT OSI SAF Sea Ice Index v2.1. Credit: Copernicus Climate Change Service/ECMWF/EUMETSAT.



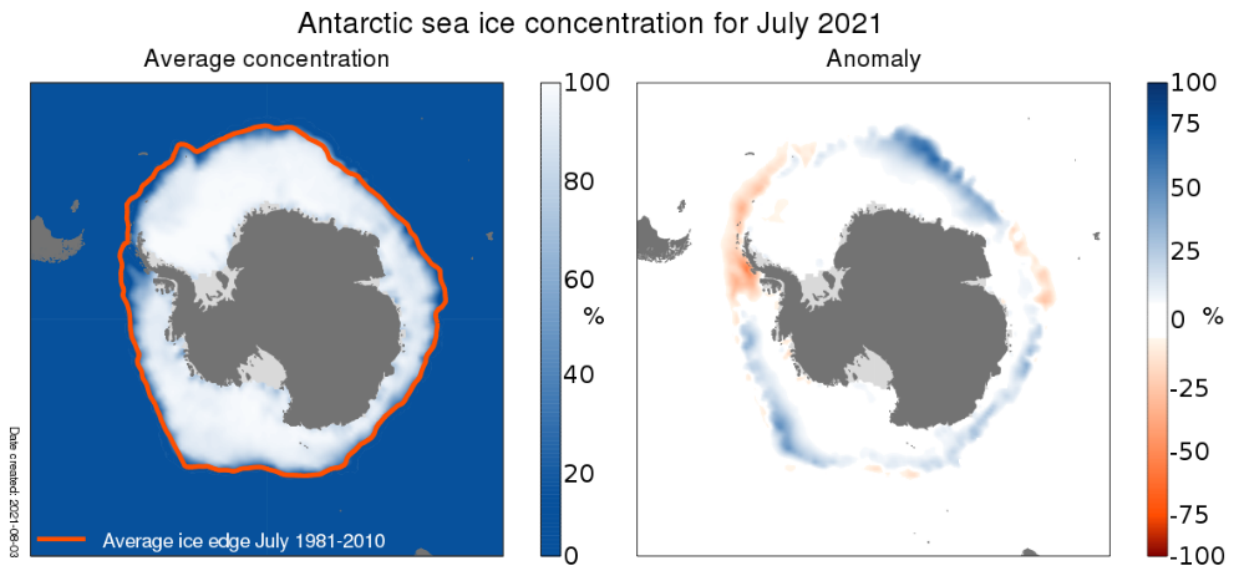
Time series of monthly mean Antarctic sea ice extent anomalies for all July months from 1979 to 2021. The anomalies are expressed as a percentage of the July average for the period 1981-2010. Note that the value for July 2016 is very close to zero, which is why it is not visible in the plot. Data source: EUMETSAT OSI SAF Sea Ice Index v2.1. Credit: Copernicus Climate Change Service/ECMWF/EUMETSAT.

სურ.11. მარცხნივ: ანტარქტიდის ზღვის ყინულის საშუალო კონცენტრაცია 2021 წლის მაისისათვის. სქელი წარინჯისფერი ხაზი აღნიშნავს მაისის ყინულის კლიმატოლოგიურ

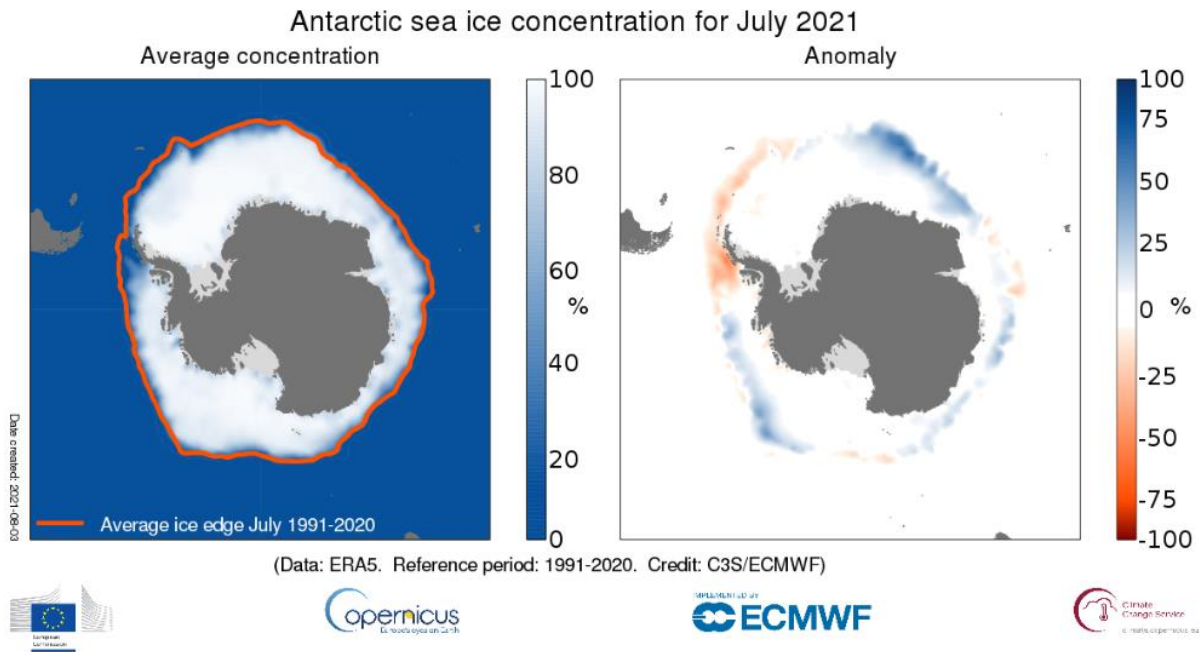


ზღვარს 1991-2020 წლების პერიოდისთვის. მარჯვნივ: ანტარქტიდის ზღვის ყინულის კონცენტრაციის ანომალიები 2021 წლის მაისისთვის, 1991-2020 მაისისთვის საშუალო მაჩვენებელთან შედარებით.

1991-2020    1981-2010



Left: Average Antarctic sea ice concentration for July 2021. The thick orange line denotes the climatological ice edge for July for the period 1981-2010. Right: Antarctic sea ice concentration anomalies for July 2021 relative to the July average for the period 1981-2010. Data source: ERA5. Credit: Copernicus Climate Change Service/ECMWF



Left: Average Antarctic sea ice concentration for July 2021. The thick orange line denotes the climatological ice edge for July for the period 1991-2020. Right: Antarctic sea ice concentration anomalies for July 2021 relative to the July average for the period 1991-2020. Data source: ERA5. Credit: Copernicus Climate Change Service/ECMWF.

## 2.5. გრენლანდია, ანომალიების შემთხვევები

გრენლანდიაში ზამთრისათვის დამახასიათებელია მუდმივი ციკლონები და ჭარბი ნალექი. ამასთან, ტემპერატურა დეკემბერში იშვიათად ეცემა  $-8^{\circ}\text{C}$ -მდე, იანვარში სანაპიროზე  $-7^{\circ}\text{C}$ . სხვა ვითარებაა სამხრეთ ნაწილში, სადაც ზამთარში მუდმივად ფიქსირდება  $-36^{\circ}\text{C}$  ტემპერატურა. თებერვალში ამინდის აერთოდ არ იცვლება და ფიქსირდება  $-47^{\circ}\text{C}$  ტემპერატურა. ფართობი შეადგენს 2.17 მლ.კვ. კმ. გრენლანდიის ყინულის მთლიანი მასის ბალანსის ცვლილებები ასახავს ზედაპირული მასის ბალანსის ერთობლივ ეფექტს, რომელიც განისაზღვრება, როგორც განსხვავება თოვლის დნობასა ჩამონადენს შორის;

გრენლანდიისთვის, მთლიანი ყინულოვანი მასის ნაშთი 2020-2021 წწ. (2020 წლის 1 სექტემბერი – 2021 წლის 31 აგვისტო) იყო -166 გტ, რაც ახლოსაა 1987-2021 წლების საშუალო სიდიდესთან. სადაც ზედიზედ 25 წელი ყინულოვანი მასის ბალანსი ნეგატიური იყო. 1986 წლის სექტემბრიდან 2021 წლის აგვისტომდე პერიოდში, სადაც გვაქვს ყოველდღიური მონაცემები, გრენლანდიის ყინულის საფარმა სულ დაკარგა 5 511

გტ ყინული. აკუმულაციური მასის დანაკარგი იყო 4 261 გტ 2002 წლის აპრილიდან 2021 წლის ივნისამდე პერიოდში (GRACE თანამგზავრების დაკვირვებებით).

GRACE და GRACE-FO თანამგზავრებს შეუძლიათ გაზომონ ყინულის მასის ბალანსის ცვლილებები იმ წუთიერი ამრეკლადობების გამოყენებით, რომლებსაც ისინი აწარმოებენ გრავიტაციულ ველში. ეს უზრუნველყოფს მთლიანი მასის ბალანსის დამოუკიდებელ გაზომვას. ამ მონაცემებზე დაყრდნობით, გრენლანდიის ყინულის საფარმა (2002 - 2021 წწ) დაკარგა დაახლოებით 4 473 გტ. ყინულის მასა, რამაც განაპირობა ზღვის დონის აწევა დაახლოებით 1.2 სმ-ით.

2020-2021 წლების მასის ბალანსის სეზონისთვის გრენლანდიაში იყო +357 გტ, რაც ოდნავ აღემატება 35-წლიან საშუალოს (1986-2020 წლებში +326 გტ), თუმცა, ყინულის სავარაუდო დანაკარგი აისბერგის და მყინვარის ენის დნობის გამო (-500 გტ), ყველაზე მაღალი იყო იმ პერიოდში (სურ.12).

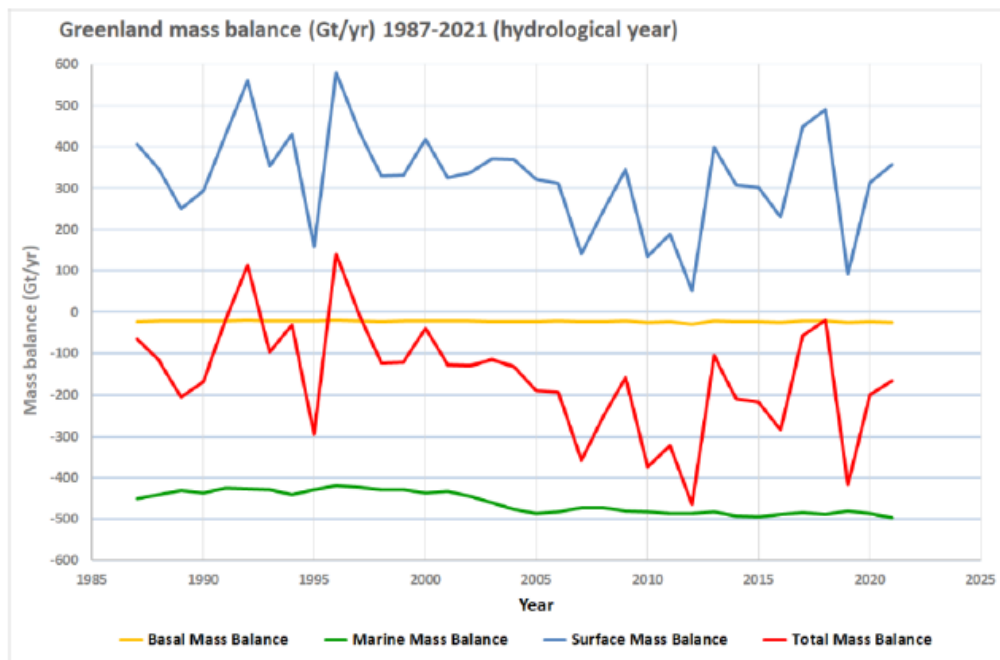
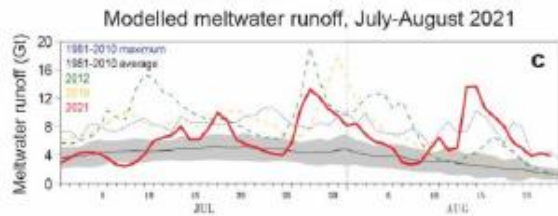
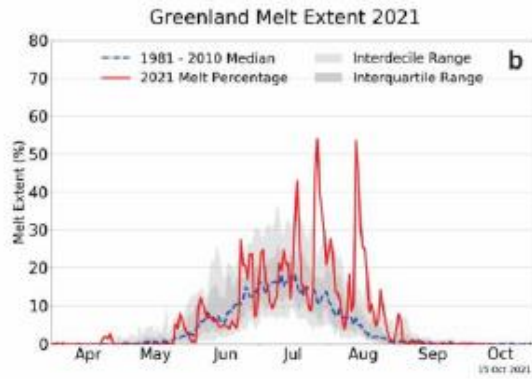
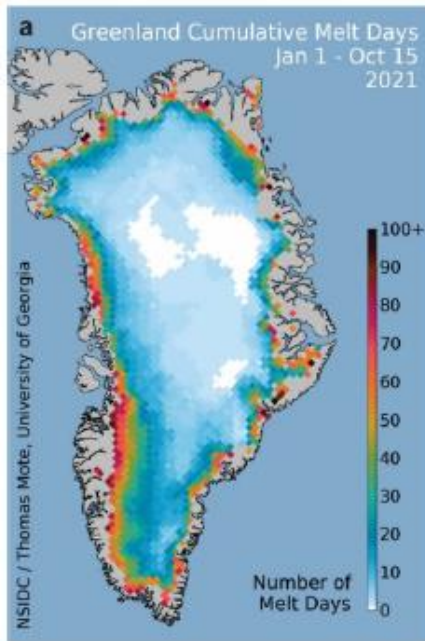


Figure 15: Components of the total mass balance of the Greenland Ice Sheet 1987-2021. Blue: Surface mass balance SMB, green: marine mass balance MMB (also referred to as discharge), orange: basal mass balance BMB, red: total mass balance TMB, the sum of SMB, MMB and BMB<sup>43</sup>.



## 2.6 თოვლის საფარი ჩრდილოეთ ნახევარსფეროში

ჩრდილოეთ ნახევარსფეროში თოვლის საფარი მცირდება გვიან გაზაფხულზე და ზაფხულში. თოვლის საფარის მოცულობა (SCE) 2021 წელს შეესაბამებოდა გრძელვადიან ტენდენციებს და განიცდიდა შემცირებას (თოვლის საფარის ანომალიით -2 მილიონი კმ<sup>2</sup>). ეს გახლავთ მესამე ყველაზე დაბალი თოვლის საფარის მოცულობა (SCE) 1970-2021 წლების განმავლობაში. გაზაფხულის თოვლის საფარის შემცირება განსხვავდება გრძელვადიანი ტენდენციისა და ოქტომბრის ბოლო მონაცემებისგან (ბოლო მონაცემი მოწოდებული არის ოქტომბერში). თუმცა, შემდგომი ინფორმაციით შემოდგომის თოვლის საფარის დადებითი ტენდენციები არ განმეორებულა (სურ.13).

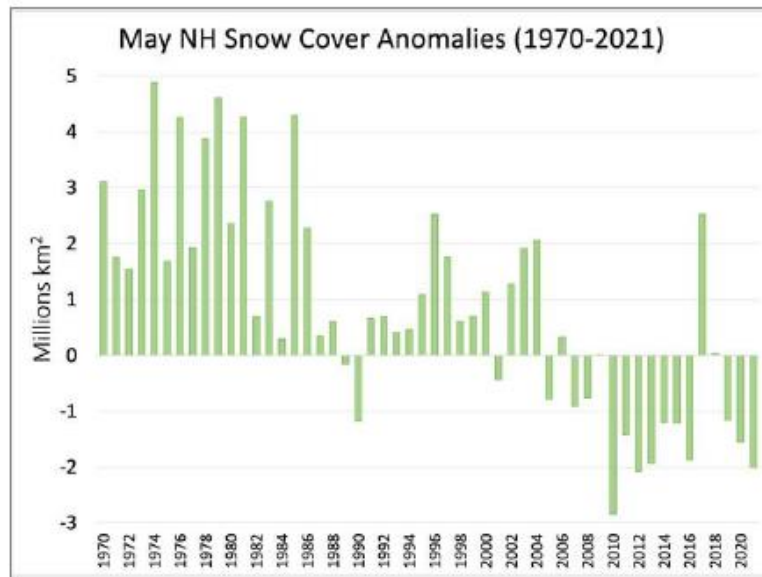


Figure 19: May snow-cover extent (SCE) anomaly in the Northern Hemisphere for the period 1970-2021, relative to the 1991-2020 average.

### მიღებული შედეგები:

1. 2021 წელს (იანვრიდან სექტემბრამდე) საშუალო ტემპერატურა დაახლოებით  $1,08 \pm 0,13^{\circ}\text{C}$ -ით აღემატება 1850-1900 წლების საშუალო მაჩვენებელს.
2. 2020-2021 წლებში ყინულის მასის ბალანსი გრენლანდიაში იყო  $+357$  გტ, რაც ოდნავ აღემატება 1986-2020 წწ-ის (35-წლიან) საშუალო სიდიდეს ( $+326$  გტ). თუმცა, ყინულის მასის სავარაუდო დანაკარგი  $-500$  გტ (აისბერგისა და მყინვარის ენის დნობის გამო), იმ პერიოდში ყველაზე მაღალი იყო.
3. 2013-2021 წლებში სატელიტური სიმაღლითი გაზომვებით დადასტურდა, რომ მსოფლიო ოკეანის დონე იზრდება  $4,4$  მმ/წ, ხოლო რეკორდულ მაჩვენებელს კი მიაღწია 2021 წელს.
4. ჩრდილოეთ ნახევარსფეროში, ზაფხულის მეორე ნახევარში, ექსტრემალურმა მაღალმა ტემპერატურამ რამდენჯერმე დააზარალა ხმელთაშუა ზღვის რეგიონი. სადაც აგრომეტეოროლოგიურმა სადგურის მონაცემებით ტემპერატურამ მიაღწია  $48,8^{\circ}\text{C}$ , რაც წარმოადგენს რეკორდულ ნიშნულს.
5. 1971-2020 წლიან პერიოდში, ოკეანის დათბობის მაჩვენებლებმა  $0-2000$  მ სიღრმის ფენაში მიაღწია  $1.0(0.6) \pm 0.1^{\circ}/\text{მ}^2$ ; ზედა  $700$  მ სიღრმეზე  $0.6(0.4) \pm 0.1^{\circ}/\text{მ}^2$ ; 1991-2018 წლებში,  $2000$  მ სიღრმეზე კვებით, ოკეანე თბებოდა, თუმცა დაბალი სიჩქარით  $0,07 \pm 0,04^{\circ}/\text{მ}^2$ .

## დასკვნა

გლობალური კლიმატის ცვლილებების ტენდენცია მსოფლიოში აღინიშნება გასული საუკუნის 70-იანი წლებიდან, რაც მკვეთრად აისახა პოლუსების დინამიკაზე.

ყინულოვანი საფარიძირითად მახალანსებელ ინდიკატორს წარმოადგენს მსოფლიო ოკეანის დონის რეგულირებისას და შესაბამისად დიდი ყურადღება ექცევა ყინულზე დაკვირვებას და მათ დინამიკას, რაც ერთ-ერთი მთავარი ინდიკატორია კლიმატის გლობალური ცვლილების შესაფასებლად. პოლუსების ყინულის საფარის შესწავლას პრაქტიკული მნიშვნელობაც აქვს, ვინაიდან ისინი წარმოადგენენ რელიეფური და კლიმატური ბალანსის უმნიშვნელოვანეს ფაქტორს.

მსოფლიო კლიმატის ცვლილების შედეგებს ყოველდღიურად განიცდის და მისი გავლენა ეკონომიკასა და ადამიანების ცხოვრებაზე შემამფოთებელია.

## გამოყენებული ლიტერატურა

1. ა. კოტარია. მეტეოროლოგიის საფუძვლები. თბილისი, 1992.
2. გარემოზე ზემოქმედების შეფასების ანგარიში, შესმსრულებელი შპს „გამა კონსალტინგი“. თბილისი 2015;
3. ლ. გვერდწითელი, თ. შარაშიძე. ატმოსფერული ჰაერის დაცვის ტექნიკა. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი 2017;
4. მ. მარგველაშილი, მ. ინაშვილი, ა. მაღალაშვილი და სხვ. კლიმატის ცვლილება და მდგრადი განვითარება, სალექციო მასალების კრებული 2016;
5. რ. გობეჯიშვილი, ვ. კოტლიაკოვი, გ. გიგინეიშვილი. გლციოლოგია. თბილისი , უნივერსალი 2006;
6. საქართველოს გარემოს დაცვისა და სოფლის მეურნეობის სამინისტრო, სსიპ გარემოს ეროვნული სააგენტო. საქართველო სამეცნიერო-გამოყენებითი კლიმატური ცნობარი, გამომცემლობა „უნივერსალი“, თბილისი 2020;
7. მეტეოროლოგიის პრობლემები. ჰიდრომეტეოროლოგიის ინსტიტუტის შრომები, ტომი 114; თბილისი 2010;
8. შ. ჯავახიშვილი. მეტეოროლოგია და კლიმატოლოგია. თბილისი, თსუ, 2000;
9. [Arctic sea ice at highest minimum since 2014 | Arctic Sea Ice News and Analysis \(nsidc.org\)](https://www.nsidc.org/news/2014/01/01/arctic-sea-ice-at-highest-minimum-since-2014)
10. L. Tielidze. The New Inventory and General Description of the Modern Glaciers, 2017;
11. L. Tielidze. The Retreat of Mountain Glaciers since the Little Ice Age: A Spatially Explicit Database, 2021;
12. WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. State of Global Climate 2021 WMO Provisional report, 2021;
13. World Data Centre for Greenhouse Gases operated by Japan Meteorological Agency <https://gaw.kishou.go.jp>
14. WMO Greenhouse Gas Bulletin, No.17, October 2021, [https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice\\_display&id=21975](https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=21975)
15. [WMO Greenhouse Gas Bulletin \(GHG Bulletin\) - No.15 | E-Library](https://www.wmo.int/e-library)
16. [Global Warming of 1.5 °C — \(ipcc.ch\)](https://www.ipcc.ch/)
17. [Headline Indicators for Global Climate Monitoring in: Bulletin of the American Meteorological Society Volume 102 Issue 1 \(2021\) \(ametsoc.org\)](https://www.ametsoc.org/monographs)
18. [Climate Change 2021: The Physical Science Basis | Climate Change 2021: The Physical Science Basis \(ipcc.ch\)](https://www.ipcc.ch/)
19. [Sea ice cover for July 2021 | Copernicus](https://www.copernicus.eu/en/sea-ice/sea-ice-cover-for-july-2021)