

**Eötvös Loránd Tudományegyetem**

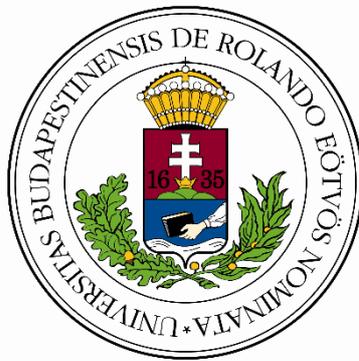
**Természettudományi Kar**

**Földrajz- és Földtudományi Intézet**

**Meteorológiai Tanszék**

# **A krioszféra változásainak elemzése az északi poláris régióban**

— SZAKDOLGOZAT —



Készítette:

**Herman Ákos**

*Földtudomány BSc – Meteorológus szakirány*

Témavezető:

**Dr. Pongrácz Rita**

*ELTE TTK Meteorológiai Tanszék*

**Budapest, 2017**

# Tartalomjegyzék

<b>1. Bevezetés.....</b>	<b>3</b>
<b>2. A krioszféra elemei.....</b>	<b>5</b>
<b>3. A krioszféra vizsgálatának lehetőségei és módszerei.....</b>	<b>7</b>
3.1. A krioszférával foglalkozó szervezetek és kutatási programok.....	7
3.1.1. Az IPCC története, működése.....	7
3.1.2. Az NSIDC és működése.....	9
3.2. Műholdas távérzékelés és repülőgépes megfigyelések.....	11
3.2.1. Az amerikai ICESat és ICESat-2 jégmonitorozó műholdjai.....	12
3.2.2. Repülőgépes mérések.....	13
3.2.3. Az európai CryoSat-2 műhold.....	15
<b>4. A Föld poláris régiói.....</b>	<b>18</b>
4.1. A sarkvidékek fogalma.....	18
4.2. A sarkvidékek éghajlata.....	18
4.3. Az Arktisz és az Antarktisz földrajzi jellemzése.....	20
4.4. Az Arktisz és az Antarktisz jégborítottsága.....	21
4.5. Az albedó szerepe a tengeri jég olvadásában.....	26
4.6. A Föld globális felszínközeli léghőmérséklete.....	27
4.7. Az Arktisz hőmérsékleti anomáliái.....	29
4.8. A globális óceáni vízhőmérséklet, tengerszint-emelkedés.....	30
4.9. Grönland jégtakarója.....	31
4.10. Egyéb érdekességek.....	35
<b>5. A detektált változások alátámasztása éghajlati adatsorok feldolgozásával.....</b>	<b>36</b>
5.1. Felhasznált adatok és módszerek.....	36
5.2. Számítások és eredmények.....	39
<b>6. Összefoglalás.....</b>	<b>43</b>
<b>7. Irodalomjegyzék.....</b>	<b>44</b>
<b>8. Köszönetnyilvánítás.....</b>	<b>46</b>
<b>9. Függelék.....</b>	<b>47</b>

# 1. Bevezetés

A globális klímaváltozás ténye napjainkban mind a tudományos közösség, mind a közvélemény számára egyre elfogadottabbá válik, hiszen egyértelmű változások figyelhetők meg a XX. század kezdete óta, azonban ezek az átalakulások a Földön térben és időben nem azonos mértékben jelentkeznek. Az egyik leginkább érintett terület az északi sarkkörön túli régió. Ugyanis, az elmúlt években a legnagyobb hőmérsékleti anomáliákat a magas szélességeken regisztrálták, valamint az Arktisz tengeri jegének kiterjedése korábban nem tapasztalt mértékben visszahúzódott (WMO<sup>1</sup> 2016). Az Arktisznak kitüntetett szerepe figyelhető meg a krioszférán, s ezáltal a globális éghajlati rendszeren belül (IPCC<sup>2</sup> 2007b).

Összegző nemzetközi tanulmányok (IPCC 2007a; IPCC 2013; NOAA<sup>3</sup> 2016) egyértelműen rámutatnak, hogy az éghajlati változások az utóbbi évtizedekben felgyorsultak. Az elmúlt időszakban az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület (IPCC) néhány évente megjelenő, átfogó helyzetértékelő jelentései a tudományos közösség és a média számára egyaránt mértékadó információforrássá váltak. Az IPCC működésének két legfontosabb jellemzője, hogy egyrészt nem feladata új kutatási eredmények előállítása, hanem a különböző tudományos intézetek, egyetemek, kutatók által publikált tanulmányokat összesíti, szintetizálja; másrészt az elkészült jelentéseket kormánydelegációk véleményezik és fogadják el. A témaválasztásom kiindulási pontját képező, több száz kutató által készített utolsó két, Negyedik (IPCC 2007a, IPCC 2007b), illetve Ötödik (IPCC 2013) Helyzetértékelő Jelentés is több vonatkozásban különleges. Előbbi alapját adta az ENSZ Éghajlatváltozási Keretegyezményéhez<sup>4</sup> kapcsolódóan 2007-ben Balin (Indonézia) megtartott Résztes Felek 13. Konferenciájának, utóbbi pedig a 2015 végén rendezett párizsi (Franciaország) Résztes Felek 21. Konferenciájának, valamint a Kiotói Jegyzőkönyv második kötelezettségvállalási időszakának (2013-2020). Az utolsó jelentés (IPCC 2013) minden eddiginél nagyobb (>95%) bizonyossággal megerősíti azt a feltételezést, hogy az elmúlt 50 évben tapasztalható globális hőmérséklet emelkedéséért az antropogén hatások – tehát maga az emberiség – felelősek.

---

<sup>1</sup> World Meteorology Organisation - Meteorológiai Világszervezet

<sup>2</sup> Intergovernmental Panel on Climate Change - Éghajlatváltozási Kormányközi Testület

<sup>3</sup> National Oceanic and Atmospheric Administration - amerikai Nemzeti Óceáni és Légköri Hivatal

<sup>4</sup> United Nations Framework Convention on Climate Change - UNFCCC

Kiemelkedő szerepe van azoknak az éghajlati központoknak, valamint a Meteorológiai Világszervezet közel 200 tagországának, amelyek a mérések kezdete óta megfelelően hosszú, homogén adatsorokat állítottak elő. Ezek az idő-sorok a tudományos értékelések és jelentések alapját képezik, illetve az éghajlatváltozás megfigyelésének és a trendek vizsgálatának elengedhetetlen feltételei. A krioszféra változásai – ezen belül legfőképpen az olvadó tengeri jég – a Föld más részeinek éghajlatára is hatással van a nagy sebességű futóáramlások (idegen szóval: jet stream) révén (WMO 2017). Az antropogén globális felmelegedés következtében a szélsőséges időjárási események száma világszerte megnövekedett (IPCC 2014). Megjegyzendő ugyanakkor, hogy az ENSO<sup>5</sup> jelenségkör a 2015/2016-os évben extrém erős aktivitást (El Niño fázis) mutatott, és ez is hozzájárult a rekordhőmérsékletek alakulásához (*Trenberth, 2016*).

Szakdolgozatom célja, hogy a rendelkezésre álló adatokat és tanulmányokat felhasználva rávilágítsak arra, hogy melyek azok a területek az északi poláris régió belül, amelyek a legnagyobb változáson mentek keresztül az iparosodás kezdete óta. Dolgozatom nehézségét az adta, hogy egy Magyarországon kevésbé kutatott témát vizsgáltam, ezért túlnyomó többségben külföldi forrásokból, cikkekből, összefoglalókból és adatsorokból dolgoztam. Valamint érdemes megjegyezni, hogy az utóbbi, rekordhalmozó évek következtében az adatok és tanulmányok gyorsan elavulttá válhatnak. Kiemelten fontosnak tartom, hogy kutatásom a hétköznapi ember számára is befogadható legyen, és egyfajta összefoglalást adjon az Északi-sarkvidéken zajló folyamatokról.

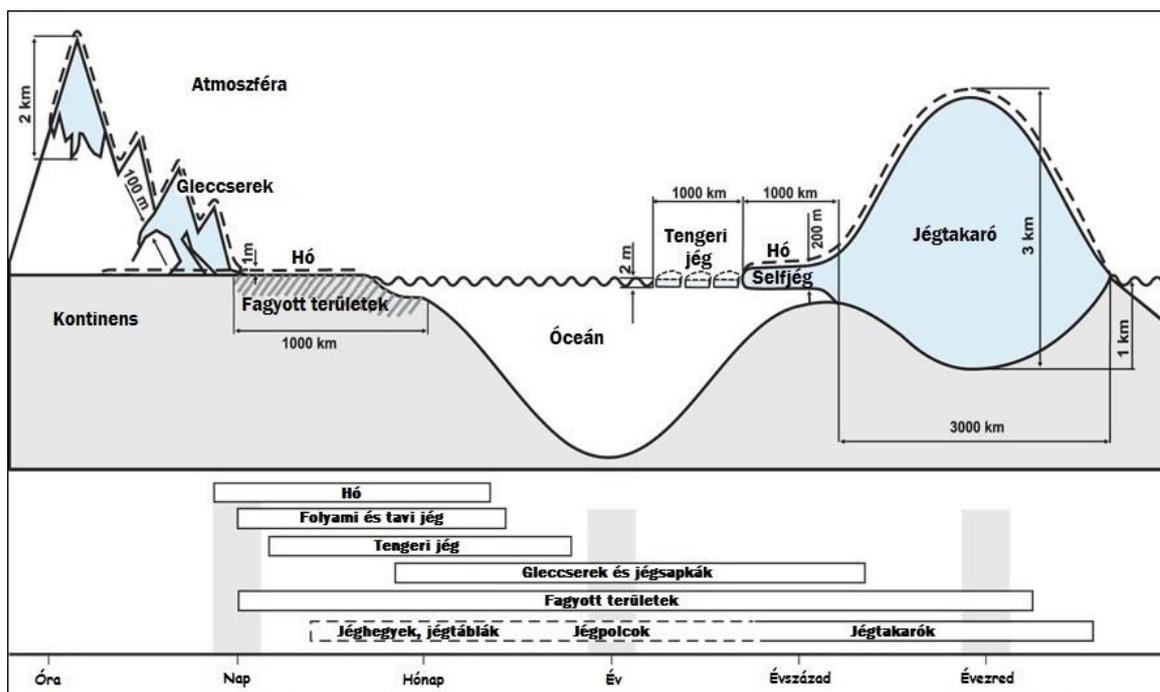
A dolgozatom első fejezeteiben a krioszféra alkotóelemeivel, valamint azok lehetséges vizsgálati módszereivel, továbbá a magas földrajzi szélességek éghajlatával és speciális tulajdonságaival foglalkozom. A 3. fejezetben összegyűjtöttem azokat a nemzetközileg elismert fontosabb szervezeteket, amelyek a legjelentősebb szerepet töltik be az Arktisz és a krioszféra monitoringozásában. A 4. fejezetben rámutatok az Arktisz és az Antarktisz közötti hasonlóságokra és eltérésekre, elemzem az átlaghőmérséklet-változást, a tengeri-jég fluktuációit, a szárazföldi jégpáncélt és a tengerszint-emelkedést. Az 5. fejezetben a rendelkezésemre álló adatsorokat dolgozom fel a tengeri jég kiterjedéséről, és Java programnyelv segítségével térképeken is megjelenítettem az eredményeket, valamint ezekből összefűzött animáción vizsgáltam a változásokat. Végül összefoglalásként kitekintést adok a választott témám lehetséges jövőbeli következményeiről.

---

<sup>5</sup> ENSO - El Niño–Southern Oscillation - El Niño – Déli Oszcilláció

## 2. A krioszféra elemei

Krioszférának a Föld azon területeit nevezzük, ahol a víz szilárd halmazállapotban van jelen. Ez magában foglalja a tavi, a folyami és a tengeri jeget, a szárazföldi hó- és jégtakarót, a gleccsereket, a jégsapkákat, valamint az állandóan vagy időszakosan fagyott permafroszt talajokat (1. ábra). Ezek az elemek mind térbeli, mind időbeli skálán jelentős eltéréseket mutatnak, amiket az alábbiakban foglalok össze.



1. ábra: A krioszféra összetevői és ezek időskálán való jellemzése.  
(forrás: IPCC 2007a)

- A krioszféra összetevői közül az *időszakos szárazföldi hótakaró* reagál leggyorsabban a légkörben lejátszódó dinamikai változásokra. A szárazföldi hótakaró hatása néhány naptól néhány hétig, esetleg néhány hónapig tartó időskálán érvényesül. A téli időszakban megjelenő kontinentális hótakaró a Föld csaknem minden részén előfordul a sarkoktól az Egyenlítőig. A hóval fedett felszínek nagy albedóval rendelkeznek, tehát a napsugárzás nagy részét visszaverik, a benne tárolt hőmennyiség a Föld egészéhez viszonyítva nem jelentős (Bartholy és Pongrácz, 2013).
- Az időskálán a második helyet a *tengeri jég* foglalja el. A folyami-tavi-tengeri jég éghajlatra gyakorolt hatása évszakos vagy annál nagyobb skálán áll fenn. Megjelenési területei az északi és a déli poláris régiókhoz köthetők. A legfontosabb

különbség, hogy az Északi-sarkvidéken egy fagyott óceánként (Jeges-tenger) jelenik meg, ami a kontinensek szárazföldjei és nyílt óceánok által van körülvéve, míg a Déli-sarkvidéken az Antarktisz peremén lévő tengeri jeget értjük, amit minden irányból óceánok határolnak. A hőegyenlegben a szárazföldi hótakaróhoz hasonló mértékkel bír. A fagyási-olvadási időszakok során szerepet játszik mélytengeri víztömegek sókoncentráció-rétegződésében (*Bartholy et al.*, 2011).

- *A magashegyi gleccserek* a sarkvidékektől távol, hegyvidéki területeken (pl. Himalája, Andok, Alpok) alakulnak ki. A gleccserképződés feltétele, hogy az adott terület a hóhatár felett helyezkedjen el és az olvadást, valamint a párolgást meghaladó mennyiségű csapadék hulljon. A hóréteg a nehézségi erő hatására elindul a lejtőn lefelé, az ismétlődő olvadások és újrafagyások következtében tömörödik, először firné, majd gleccserjéggé alakul. A gleccserek életkorát évszázados időskálán határozhatjuk meg és a jégtakarók után a második legnagyobb édesvízi tározónak számítanak. A gleccserek nagyon érzékenyek a környezeti változásra, emiatt fontos a szerepük a tengerszint alakulásában.
- *Permafrosztnak* nevezzük azokat a talajokat, amelyek legalább 2 éven keresztül fagyott állapotban vannak. Nagyrészt az északi sarkkör környékén fordulnak elő és a Föld talajainak körülbelül 20%-a tartozik ide. A nyári időszakban a permafroszt felső rétege megolvadhat, de ezen aktív réteg alatt a talaj állandóan fagyott állapotban marad. Ezek a területek a világ legnagyobb metán- és széntározói, becslések szerint a légkör CO<sub>2</sub> mennyiségének kétszeresét kötik meg.
- *A jégtakarók* a krioszféra legrégebbi képviselői. A jégtakarók alatt a Grönlandot és az Antarktiszot fedő több kilométer vastag jégréteget értjük, amelynek kora több millió évre tehető, így szinte állandóan jelenlévő felszíni formációnak tekinthetők. Ezek a jégtömegek tartalmazzák a Föld édesvízkészletének körülbelül 80%-át, ezáltal a hidrológiai ciklusban tározó szerepet töltenek be, így bármely megváltozás lényeges tengerszint-változást eredményezne (*Bartholy et al.*, 2011).

## **3. A krioszféra vizsgálatának lehetőségei és módszerei**

### **3.1. A krioszférával foglalkozó szervezetek és kutatási programok**

A visszahúzódó sarkvidéki jégtakaró dinamizmusának feltérképezése fontos a globális éghajlatváltozás megértésében. A világ legnagyobb űrkutatási szerve, az amerikai NASA<sup>6</sup> és az európai államok nagy részét magába foglaló ESA<sup>7</sup> által támogatott távérzékelési programok, műholdas és repülőgépes megfigyelések biztosítják a megfelelő adatbázis létrehozását. A távérzékelési eszközöknek köszönhetően háromdimenziós bepillantást nyerhetünk az Északi- és a Déli-sarkvidéken található gyorsan változó szárazföldi és tengeri jégtömegek kutatásába.

Az adatok összegyűjtését, illetve értékelését sok kisebb-nagyobb szervezet végzi, melyek közül az IPCC-t és az amerikai NSIDC<sup>8</sup>-t ebben a fejezetben részletesen is bemutatok. A NASA 2003 elején indította el a poláris ICESat<sup>9</sup> programját. Ez volt az első olyan földfigyelő műhold, amely kifejezetten a krioszféra kutatására indult. A közel 7 évig tartó sikeres működés után a műhold 2010-ben megsemmisült. A NASA következő hasonló küldetése – a második generációs ICESat-2 program – 2018 környékén indul. A két műhold működése közötti átmeneti időszakot a NASA repülőgépes mérésekkel próbálja áthidalni. Ez az ún. Operation IceBridge program. Továbbá az ESA 2010 és 2015 között futtatta a CryoSat-2 programját, melynek elsődleges célja szintén a jégsapkák vizsgálata. Ezeknek az együttműködéseknek köszönhetően közel teljes lefedettséget kapunk és csaknem folytonos adatsor áll rendelkezésünkre a részletes elemzésekhez.

#### **3.1.1. Az IPCC története, működése**

Az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület (IPCC) (2. ábra) a Meteorológiai Világszervezet (WMO) és az ENSZ Környezetvédelmi Programja (UNEP<sup>10</sup>)

---

<sup>6</sup> National Aeronautics and Space Administration - Nemzeti Repülési és Űrhajózási Hivatal

<sup>7</sup> European Space Agency - Európai Űrügynökség

<sup>8</sup> National Snow and Ice Data Center - amerikai Nemzeti Hó és Jég Adatközpont

<sup>9</sup> Ice, Cloud and land Elevation Satellite - Jeget, Felhőt és szárazföldi Magasságot vizsgáló Műhold

<sup>10</sup> United Nations Environment Programme - ENSZ Környezetvédelmi Programja

kezdeményezésére 1988-ban, Torontóban alakult meg, melynek működését ugyanebben az évben az ENSZ Közgyűlése is elfogadta [1 - IPCC].



*2. ábra: Az IPCC hivatalos logója  
(forrás: [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch))*

Az IPCC vezető nemzetközi szerepet tölt be az éghajlatváltozás kutatásában. Feladata, hogy a legújabb tudományos, műszaki és társadalmi-gazdasági információk összegyűjtésével és felhasználásával átfogó, valamint mindenki számára átlátható képet adjon a klímaváltozás kockázatairól, illetve az alkalmazkodás és a megelőzés lehetőségeiről. Az IPCC nem vesz részt összefüggő éghajlati adatsorok előállításában, hanem értékeléseit a már publikált tudományos szakirodalom alapján készíti. A szervezet által kiadott jelentések alapelve a politikai objektivitás. Az IPCC a 2007-es évben kiemelkedő munkásságáért elnyerte a Nobel-békedíjat [1 - IPCC].

Az IPCC keretében három munkacsoporton belül folyik a tudományos munka. Az első munkacsoport (WG1<sup>11</sup>) az éghajlati rendszerrel összefüggő adatokkal foglalkozik. Értékeli az eddig megfigyelt adatokat és becsléseket ad a hosszú távon várható változásokra. Elemzi az üvegházhatású gázok és az aeroszol részecskék koncentrációját, a léghőmérséklet-változást és csapadék-eloszlást a szárazföldre és az óceánok felett, a gleccserek és jégtakarók olvadása által okozott tengerszint-emelkedést, valamint a szén ciklust. Történelmi és paleoklimatológiai módszerek felhasználásával, illetve műholdas megfigyelésekkel és klímamodellek futtatásával vizsgálja a globális klímaváltozás okait. A második munkacsoport (WG2) feladata a természeti és társadalmi-gazdasági rendszerek globális éghajlatváltozással szembeni érzékenységeinek, a változások pozitív és negatív hatásainak és a következményekre való felkészülés lehetőségeinek analizálása. A globális változást kiváltó tényezők – elsősorban az antropogén eredetű üvegházhatású gázok – mérséklésének,

---

<sup>11</sup> Working Group - Munkacsoport

illetve csökkentésének lehetséges módjait a harmadik munkacsoport (WG3) diagnosztizálja. Feltárja a főbb gazdasági ágazatok (pl. az energetika, az ipar, a közlekedés, a mezőgazdaság, az erdő- és hulladékgazdálkodás) lehetséges eszközeit és az alkalmazható politikai intézkedéseket [1 - IPCC].

Az IPCC tevékenységének legfontosabb feladata a rendszeres időközönként kiadott összefoglaló ún. helyzetértékelő jelentések elkészítése. A tudományos bizonyítékokkal alátámasztott Első Helyzetértékelő Jelentés (FAR<sup>12</sup>) 1990-ben jelent meg, amely rávilágított a klímaváltozás problémakörének nemzetközi együttműködéssel való kezelésének szükségességére. Ez döntő szerepet játszott az ENSZ Éghajlatváltozási Keretegyezménye (UNFCCC<sup>13</sup>) létrehozásában, amely az addigi legfontosabb nemzetközi szerződés volt a globális felmelegedés kezelésére és az üvegházhatású gázok kibocsátásának stabilizálására. Második helyzetértékelő jelentése „Éghajlatváltozás 1995” (SAR<sup>14</sup>) címmel jelent meg, amely előkészítette az 1997-es Kiotói Jegyzőkönyv elfogadását. A harmadik és a negyedik helyzetértékelő jelentése „Éghajlatváltozás 2001” (TAR<sup>15</sup>)-, illetve az „Éghajlatváltozás 2007” (AR<sup>16</sup>) néven született meg, majd ezt követte a jelenlegi utolsó, Ötödik Helyzetértékelő Jelentés (AR<sup>17</sup>) kiadása, melyet 2014-ben véglegesítettek, de létrehozását 2008 óta tartó, több éves kutatómunka előzte meg. Ezek a helyzetértékelő jelentések összefoglalják az aktuális kutatási eredményeket, prezentálják a várható becsléseket és feltárják a lehetséges válaszlépéseket [1 - IPCC].

### **3.1.2. Az NSIDC és működése**

Az amerikai Nemzeti Hó és Jég Adatközpont (NSIDC) (3. ábra) az Amerikai Egyesült Államokban működő információs központ, amely a poláris régiók és a krioszféra kutatásának támogatására jött létre. Az Adatközpont digitális és analóg módon vizsgálja és archiválja a hóra és jégre vonatkozó adatokat. Továbbá naprakész adatbázist tart fent a szárazföldi hótakaróról, statisztikai elemzéseket készít a Földön bekövetkező lavinákról, figyeli a gleccserek és a jégtakarók méretét, méri a tengeri és a szárazföldi jég csökkenését,

---

<sup>12</sup> First Assessment Report - Első Helyzetértékelő Jelentés

<sup>13</sup> United Nations Framework Convention on Climate Change - Egyesült Nemzetek Szövetsége Éghajlatváltozási Keretegyezménye

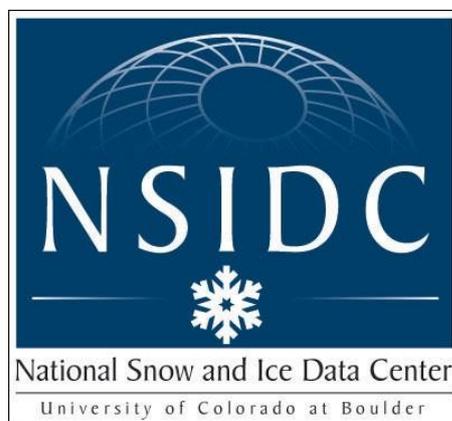
<sup>14</sup> Second Assessment Report – Második Helyzetértékelő Jelentés

<sup>15</sup> Third Assessment Report – Harmadik Helyzetértékelő Jelentés

<sup>16</sup> Fourth Assessment Report – Negyedik Helyzetértékelő Jelentés

<sup>17</sup> Fifth Assessment Report – Ötödik Helyzetértékelő Jelentés

valamint tanulmányozza a permafrosztot és a jégmagok összetételét. Emellett biztosítja az adatokhoz való hozzáférést, támogatja az adatfelhasználókat és publikációkon keresztül informálja a közvéleményt a hidegövezet aktuális állapotáról. Tudósaik a krioszféra elemeinek távérzékelésére szakosodtak [2 - NSIDC].



3. ábra:  
*Az NSIDC hivatalos logója (forrás: NSIDC)*

Az NSIDC gyökerei az 1957-es esztendőig nyúlnak vissza, amikor az amerikai USGS<sup>18</sup> létrehozta a WDC-t<sup>19</sup> azzal az elsődleges céllal, hogy összegyűjtse és archiválja az összes rendelkezésre álló gleccsertani információt. A szerveződés, amit ma már NSIDC-nak hívunk, 1976-ban indult, amikor a USGS átadta a WDC irányítását a NOAA-nak és a központ a Boulder-be, a Coloradói Egyetemre költözött. 1982-ben a NOAA a WDC kibővítéseként létrehozta a NSIDC-t, amely az 1980-as és 1990-es években fokozatosan elnyerte a legnagyobb szervezetek támogatását is. A NSIDC a megalakulása óta nagy fejlődésen ment keresztül, kifejlesztette a krioszférával kapcsolatos adatok átfogó kezelését a legkisebb szöveges fájlaktól kezdve a NASA által készített és közreadott óriási méretű műholdképekig [2 - NSIDC].

Az ELOKA<sup>20</sup> a 2007-2009-es Nemzetközi Sarki Év keretében az NSIDC által az Arktisz kutatására indult nemzetközi program. Az ELOKA összegyűjti a hagyományos helyi ismereteket és a helyi őslakosok megfigyeléseit, és átadja a megfelelő nyugati módszereket a bennszülöttek számára. Az NSIDC 2011 nyarán az elavult, nagy hűtésigényű számítógépes

---

<sup>18</sup> United States Geological Survey – Amerikai Geológiai Szolgálat

<sup>19</sup> World Data Center – Adatok Világközpontja

<sup>20</sup> Exchange for Local Observations and Knowledge of the Arctic – Az Arktisz helyi megfigyeléseinek és tudásainak cseréje

rendszert lecserélve létrehozott egy online adatközpontot (a GDC<sup>21</sup>-t), így csökkentve a szén-dioxid kibocsátást és egyben technológiai példát mutatva a hatékonyabb energiafelhasználásra. Az NSIDC jelenlegi kutatásait és tudományos adatkezelési tevékenységét a NASA, az NSF<sup>22</sup>, a NOAA<sup>23</sup> és más állami csoportok támogatják különböző versenyképes ösztöndíjakon és szerződéseken keresztül. Szervezetileg az NSIDC a Coloradói Egyetem Környezettudományi Kutatóintézetének (CIRES<sup>24</sup>) része [2 - NSIDC].

## 3.2. Műholdas távérzékelés és repülőgépes megfigyelések

### 3.2.1. Az amerikai ICESat és ICESat-2 jégmonitorozó műholdjai

Az ICESat (4. ábra) a NASA földvizsgáló rendszerének (EOS<sup>25</sup>) tagja. Elsődleges feladata a sarkvidéki jégtakaró topográfiájának és időbeli változásának tanulmányozása, de további küldetése lesz a felhők és az aeroszolok globális eloszlásának, valamint domborzati karakterisztikák és a szárazföldi növényborítottság vizsgálata [3 - NASA].



4. ábra: Az ICESat műhold a Föld körül (forrás: NASA)

---

<sup>21</sup> Green Data Center – Zöld Adatközpont

<sup>22</sup> National Science Foundation – amerikai Nemzeti Tudományos Alap

<sup>23</sup> National Oceanic and Atmospheric Administration – amerikai Nemzeti Óceáni és Légköri Hivatal

<sup>24</sup> Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences at the University of Colorado Boulder – Környezettudományi kutatások együttműködési intézete Boulder-ben a Colorado-i Egyetemen

<sup>25</sup> Earth Observing System – Földmegfigyelési rendszer

A kvázipoláris pályán keringő ICESat műholdat 2003 januárjában indították Delta-2 hordozórakétával az amerikai Vandenberg Légitámaszpontból és 7 évig teljesített szolgálatot. A műhold egyetlen műszere a lézeres magasságmérést végző GLAS<sup>26</sup>. A GLAS a távolság mérésére szolgáló lidarból, egy GPS<sup>27</sup>-ből és egy pályamagasságot meghatározó rendszerből áll. A berendezés 4 nanomásodpercenként lézernyalábot bocsájt ki az infravörös és a látható fény zöld tartományában. A visszaverődő fotonokat egy 1 m átmérőjű teleszkóp gyűjti. A műszer korlátozott élettartama miatt évente csak 3-4 alkalommal végeztek méréseket több hetes ciklusban. A küldetés ideje alatt összesen 16 ilyen mérési sorozatot hajtottak végre. Az eredetileg 3 évre tervezett program 2010 elején ért véget, miután a magasságmérő berendezés utolsó lézere is felmondta a szolgálatot. A küldetés és a műhoddal kapcsolatos legfontosabb információkat az 1. táblázat foglalja össze.

1. táblázat: Az ICESat műhold adatai (forrás: NASA)

ICESat			
Ürügynökség	NASA (Nemzeti Repülési és Űrhajózási Hivatal)		
Típus	Földfigyelő műhold		
Küldetés			
Indítás dátuma	2003. január 13.		
Indítás helye	Kalifornia Űrrepülőtér (Vandenberg Légitámaszpont), USA		
Hordozórakéta	Delta-2		
Élettartam	7 év		
Küldetés vége	2010. február		
Légkörbe lépés	2010. augusztus 30., Barents-tenger		
Pályaelemek		Adatok	
Pálya	kvázipoláris	Tömeg	970 kg
Átlagos pályamagasság	590 km	Méret	300 kg
Inklináció	94°	Keringési idő	101 perc
Műszer			
GLAS: Geoscience Laser Altimeter System			

A küldetés során sikerült megérteni az északi poláris régió tengeri jégtakarójának visszahúzódását, illetve az antarktisi és a grönlandi gleccserek viselkedését. Egy brit kutatócsoport által kiadott tanulmány (Pritchard et al., 2009) a GLAS által gyűjtött adatokból próbál magyarázatot adni a 2003 és 2007 között bekövetkezett változásokra. A kutatók kimutatták, hogy a grönlandi gleccserek sebessége gyorsul (akár >100 m/év). A legnagyobb veszteség az északnyugati és a délkeleti partvidéken tapasztalható. A gyorsuló gleccserek miatt csökken a kontinentális jégtakaró és emelkedik a világoceán globális

<sup>26</sup> Geoscience Laser Altimeter System – Földtudományi lézer magasságmérő rendszer

<sup>27</sup> Global Positioning System – Globális Helymeghatározó Rendszer

szintje.

A NASA krioszféra-kutatási, műholdas távérzékelési programja 2018 környékén folytatódhat, ugyanis ekkor tervezik fellőni a hasonló paraméterekkel rendelkező ICESat-2 műholdat. Az egyetlen nagy különbség, hogy a GLAS lézeres magasságmérő műszert a NASA által fejlesztett ATLAS<sup>28</sup> váltja fel. Az ATLAS lézernyalábja a látható fény tartományában, azon belül a zöld színnek megfelelő hullámhosszon fog méréseket végezni.

A két műhold működése közötti kritikus átmeneti időszakot a NASA merevszárnyú repülőgépekkel végzett mérésekkel próbálja pótolni. Ez az ún. Operation IceBridge program.

### 3.2.2. Repülőgépes mérések

Az Operation IceBridge (2009-2016) a valaha volt legnagyobb repülőgépes adatgyűjtési program, melynek keretében évente egyszer végeznek nagyobb repülőgépes méréseket. A küldetés célja, hogy a betöltse az ICESat nyugdíjazása és az ICESat-2 nevű utódjának üzembe helyezése közötti kritikus időszakot. A NASA által finanszírozott első járatok 2009 tavaszán Grönlandot, 2009 őszén pedig az Antarktiszt térképezték fel. Kezdetben DC-8-as típusú repülőket használtak, majd 2010-től már P-3 Orion, Air B-200, Gulfstream V és Guardian Falcon gépeket is bevetettek. A repülő laboratórium korszerű lézeres magasságmérőket, radarokat és térképészeti műszereket tartalmaz, amelyek lehetővé teszik az adatgyűjtést a jövőbeli modellek számára (5. ábra) [4 - NASA].

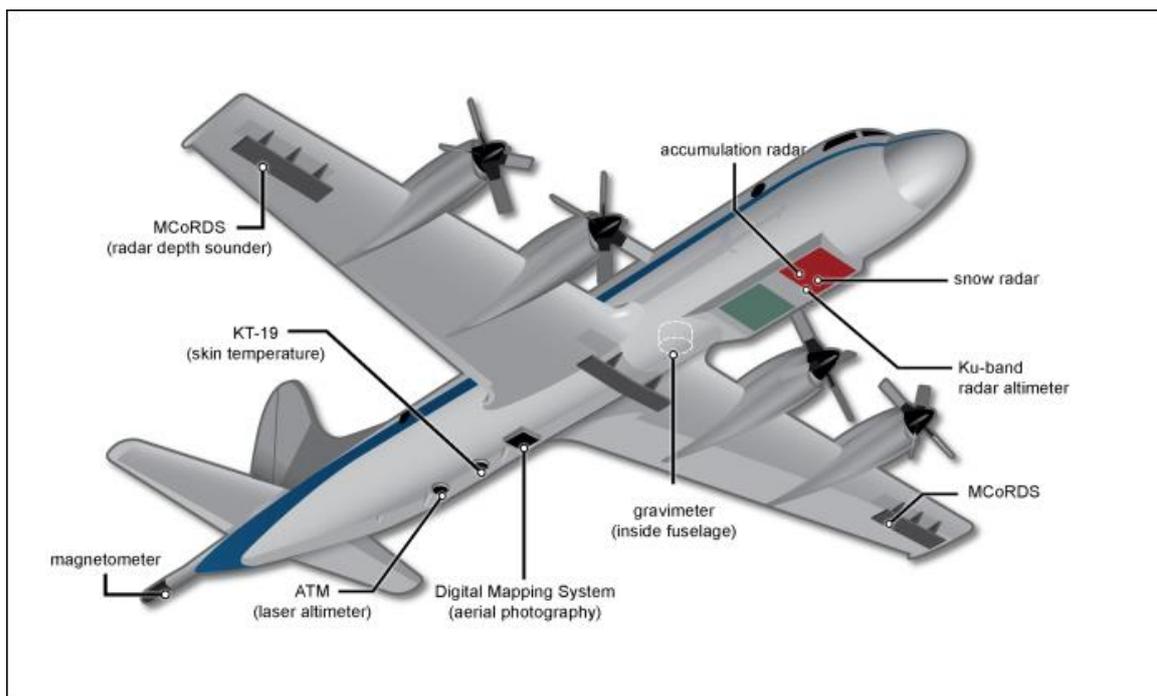
A repülőgépeken megtalálható ATM<sup>29</sup> egy lézeres magasságmérő, ami lézer fényt bocsájt ki a jég felszínére, majd azt méri, hogy milyen gyorsan érkezik vissza a visszavert sugárnyaláb. Ennek időtartamából és a repülőgép helyzetéből kiszámítható a jég vastagsága. A méréseket évről évre ugyanazon terület felett kell elvégezni, hogy a változásokról folytonos idősorokat kapjunk. A repülőgépeken használt másik műszer, az LVIS<sup>30</sup> szintén egy lézeres elven üzemelő magasságmérő, amit nagyobb magasságokra optimalizáltak, ezáltal nagyobb területeket képes feltérképezni, és ezáltal kibővíti a repülőgépes mérések hatótávolságát.

---

<sup>28</sup> Advanced Topographic Laser Altimeter System – Továbbfejlesztett lézer magasságmérő rendszer

<sup>29</sup> Airborne Topographic Mapper – Léggörből történő térképező

<sup>30</sup> Land Vegetation and Ice Sensor – Szárazföldi növényzet és jég detektáló szenzor



5. ábra: Az IceBridge tudományos méréseinek eszközei  
(forrás: NASA/Operation IceBridge)

A több csatornán és széles frekvencián működő MCoRDS<sup>31</sup> műszer a jégvastagság mérésére szolgál, feltérképezi a belső jégrétegeket és a jégrétegek alatti alapkőzetet. A Hó Radar (Snow Radar) a szárazföldet és a tengeri jeget borító hóréteget monitorozza, míg a nagy felbontású Ku-sávú Magasságmérő Radar (Ku-band Radar Altimeter) a hóréteg alatti jeget vizsgálja. A Felhalmozódási Radar (Accumulation Radar) egy lefelé néző digitális fényképezőgép, ami a jégréteg felső részéről készít nagyfelbontású képeket, amelyek alapján a tudósok a hó felhalmozódásának mértékét tudják kutatni. A DMS<sup>32</sup> egy fedélzeti digitális képkalkoló rendszer, amely képes nagyfelbontású képeket gyártani a sarki jégről, és a tengeri jégrétegen lévő repedések keresésére használják. A széles körben használt graviméter (Gravimeter) a repülőgépek alatti gravitációs mezőt méri. Ennek segítségével meghatározható a jégrétegek alá bezárt vízüregek és a selfjég kiterjedése. A nagyobb sűrűségű szárazföldi területeken zajló jégáramlás gravitációs mezeje nagyobb a tengereken úszó jégtömbökénél. A magnetométer (Magnetometer) a jég alatti kőzet tulajdonságairól gyűjt adatokat. A sűrűségből és a mágneses adatokból következtetni lehet az alapkőzet típusára [4 - NASA].

<sup>31</sup> Multichannel Coherent Radar Depth Sounder – Többcsatornás Koherens Mélységmérő Radar

<sup>32</sup> Digital Mapping System – Digitális Térképező Rendszer

A repülőgépes vizsgálatok hátránya a műholdas megfigyelésekkel ellentétben, hogy a mérések sokkal kisebb területre korlátozódnak, illetve évente csak néhány hetes időtartamot ölelnek fel. Előnye viszont, hogy sokkal több műszerrel képes adatokat gyűjteni, és csak a tudomány számára érdekes területeket monitorozza, továbbá bizonyos radarok csak alacsony magasságokon működőképeseek [4 - NASA].

2013 augusztusában az IceBridge adataiból a kutatók detektálták a Föld eddig ismert legnagyobb kanyonját Grönlandon (Greenland's Grand Canyon), amely 750 km hosszú, 10 km széles, és egyes részeken eléri a 800 m mélységet (*Bamber et al.*, 2013).

### 3.2.3. Az európai CryoSat-2 műhold

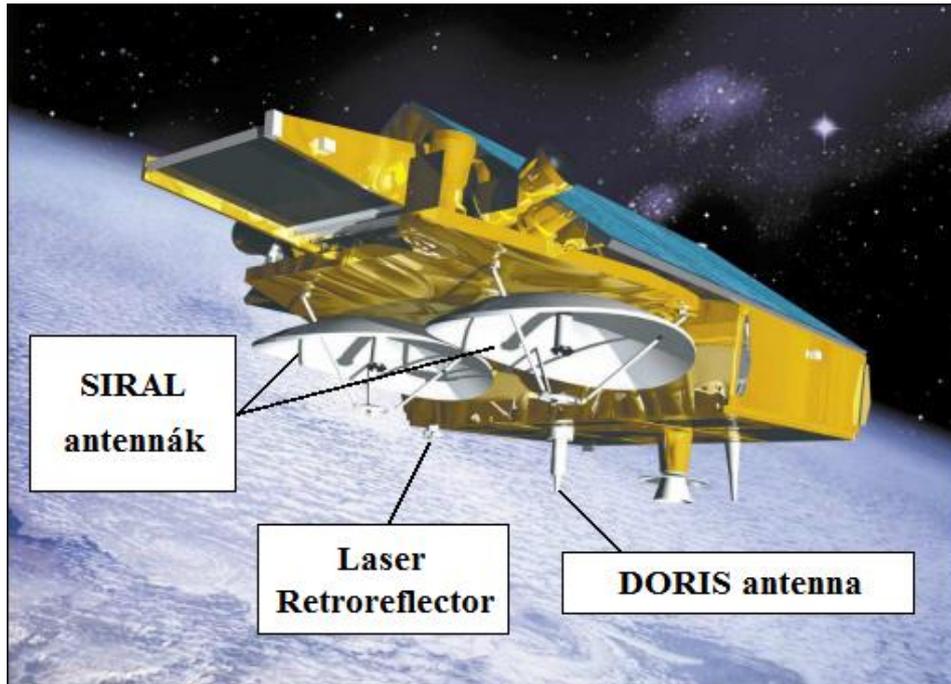
A CryoSat-2 az ESA<sup>33</sup> által finanszírozott földfigyelő műhold, melynek célja a sarkvidéki óceánok és a szárazföldi jégtakarók vastagságának folyamatos és pontos mérése. A műhold által mért adatok segítenek megérteni a sarkvidéki jégtömegek elvékonyodását, amely régiók a legérzékenyebbek a globális klímaváltozás hatásaira.

A műhold fellövésének előzménye a sikertelen CryoSat program. A CryoSat műholdat 2005. október 8-án állították volna Föld körüli pályára az oroszországi Pleszeckből, azonban a Rokot hordozórakéta irányítórendszere meghibásodott, a műhold nem érte el a kijelölt pályát és darabjai Grönland és Kanada között a Jeges-tengerbe hullottak. A műhold megsemmisülése nagy veszteség volt az ESA számára, de a jéggel borított területek vizsgálatának fontossága miatt a programot újraindították. A CryoSat-2 megépítésére mindössze 3 év állt rendelkezésre, és elődéhez képest 85 kisebb-nagyobb módosítást hajtottak végre. Legfontosabb különbség, hogy a fő mérőműszerből, a SIRAL<sup>34</sup> radaros magasságmérőből – az eredeti műholdhoz képest – már nem egy, hanem kettő került elhelyezésre. A sikeres fellövésre 2010. április 8-án – immáron Dnyepr orosz hordozórakétával – került sor a kazahsztáni Bajkonuri űrrepülőtérrel [5 - ESA].

---

<sup>33</sup> European Space Agency – Európai Űrügynökség

<sup>34</sup> Synthetic Aperture Radar Interferometric Radar Altimetry – Interferometrikus radaros magasságmérő



6. ábra: A CryoSat-2 műhold fő fedélzeti műszerei  
(forrás: Airbus Defense and Space, Drinkwater et al., 2004 alapján)

A CryoSat-2 nagy előnye, hogy kvázipoláris pályájából adódóan magas földrajzi szélességek fölött is képes méréseket végezni. A jég-óceán kölcsönhatások megértéséhez nagy felszíni és időbeli felbontású mérési adatokra van szükség, amelyben szintén megelőzi elődeit. A kb. 700 km magas pályán keringő műholdat három fedélzeti műszerrel látták el (6. ábra). Fő fedélzeti műszere az interferometrikus radaros magasságmérő (SIRAL), mely képes a szárazföldi és a tengeri jégtakaró centiméter pontosságú mérésére. A helymeghatározáshoz a GPS elven detektáló, szintén néhány centiméteres hibahatáron belül működő DORIS<sup>35</sup> rendszert használják. Ennek lényege, hogy a földfelszínről kisugárzott rádiójelek Doppler-eltolódásából származtatott relatív sebességek alapján megadható a műhold pontos pozíciója. Az LRR<sup>36</sup> tükrök a Földről végzett pontos lézeres távmérést szolgálják (Drinkwater et al., 2004).

---

<sup>35</sup> Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite

<sup>36</sup> Laser Retroreflector

A CryoSat-2 az ESA Earth Explorer programjának harmadik műholdja a másik két földfigyelő mesterséges műhold – a Föld gravitációs erőterét vizsgáló GOCE<sup>37</sup> és a talaj nedvességtartalmát, valamint a tengervíz sótartalmát kutató SMOS<sup>38</sup> – után. A küldetés és a műholddal kapcsolatos legfontosabb információkat a 2. táblázat foglalja össze.

2. táblázat: A CryoSat-2 műhold adatai (forrás: ESA)

CryoSat-2			
Ürügynökség	ESA (Európai Űrügynökség)		
Típus	Földfigyelő műhold		
Küldetés			
Indítás dátuma	2010. április 8.		
Indítás helye	Bajkonuri űrrepülőtér, Kazahsztán		
Hordozórakéta	Dnyepr		
Tervezett élettartam	3,5 év		
Pályaelemek		Adatok	
Pálya	kvázipoláris	Tömeg	720 kg (37 kg üzemanyag)
Átlagos pályamagasság	717 m	Méret	4,6 x 2,4 x 2,2 m
Inklináció	92°	Keringési idő	99 perc
Pályasebesség	7 km/s		
Műszerek			
SIRAL: SAR Interferometer Radar Altimeter			
DORIS: Doppler Orbitography and Radiopositioning Integration by Satellite			
LRR: Laser Retroreflector			

<sup>37</sup> Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer – Gravitációs mezőt és kvázipermanens óceáni cirkulációt felfedező program

<sup>38</sup> Soil Moisture and Ocean Salinity mission – Talajnedvesség és óceáni sótartalom küldetés

## 4. A Föld poláris régiói

### 4.1. A sarkvidékek fogalma

Az égitesteknek azokat a felszíni területeit, amelyek a forgástengelyük közelében helyezkednek el, sarkvidékeknek vagy más néven poláris régióknak nevezzük. Ezekre a területekre az égitest többi részétől eltérő, sajátos fizikai és környezeti tulajdonságok jellemzők, amelyek a forgásból és egyéb fizikai kölcsönhatásokból erednek. A Föld esetében a fő kialakító tényező a forgás mellett, hogy a Naptól érkező sugárzás eloszlása nem egyenletes (Péczely, 1979). Éghajlati becslések szerint (IPCC 2013, WMO 2017) a sarkvidékek nagyon érzékenyek a klímaváltozás hatásaira, ezért az egész bolygóra nézve jelentős szerepet töltenek be, így különösen fontos az alapos megfigyelésük és vizsgálatuk. A Föld poláris régióinak vizsgálatára önálló tudományág fejlődött ki.

### 4.2. Az sarkvidékek éghajlata

A Földet öt többé-kevésbé elkülöníthető szférára oszthatjuk: atmoszféra, hidroszféra, krioszféra, litoszféra és bioszféra, melyek a globális éghajlati rendszer alapelemei is egyben. Ezek közül a krioszféra a földi hó és jég elemeket foglalja össze.

Az éghajlat Péczely (1979) definíciója szerint „a légkör fizikai tulajdonságainak és folyamatainak egy adott helyen hosszabb időszak (rendszerint néhány évtized) során a környezettel és egymással is kölcsönhatásban álló rendszere”. Az éghajlat tehát a fizikai és kémiai állapotjelzők hosszabb időszakból vett statisztikai adatsoraival jellemezhető, amelyeken vizsgálható az átlag, a szórás, a trendek, a szélsőértékek és a periodikus ingadozások. Az említett hosszabb időszakot referenciaidőszaknak hívjuk és az elemzések során legalább 30 éves időtartamhoz (éghajlati normálidőszakhoz) szoktunk viszonyítani.

Az éghajlatot alakító tényezők a napsugárzásból származó hőenergián és a felszín anyagi összetételén túl a domborzat és tengerszint feletti magasság, a tengerek hő- és vízgőzszállítása, valamint az általános földi légkörczés. A napsugárzás mennyiségének övezetes eloszlását a Föld tengelyferdesége határozza meg. Mivel a levegő és a földfelszín anyaga inhomogén, ezért a szoláris éghajlati zónák szabályossága módosul. A szárazföldek és az óceánok eltérő albedóval rendelkeznek, azaz a napsugarakat eltérő mértékben verik vissza.

A trópusoktól a pólusok felé haladva a besugárzás folyamatosan csökken. A sarkköröktől a pólusok felé elindulva a napsütéses napok száma egyre kisebb, illetve egyre

több, attól függően, hogy melyik féltekén vagyunk. A besugárzás a világos évszakban sem elegendő a terület nagymértékű felmelegedéséhez.

A legmagasabb évi középhőmérséklet vonalát termikus egyenlítőnek hívjuk és ennek átlagos helyzete ez az Egyenlítőtől északra, a 10° északi szélességnél található. A térítőktől a sarkvidékek felé haladva a hőmérséklet-csökkenés mértéke 1 °C/145 km. Hasonló mértékű hőmérsékletváltozás vertikális irányban globálisan átlagosan mintegy 154 méterenként jelentkezik (azaz 0,65 °C/100 m a vertikális hőmérsékleti gradiens átlagos értéke), míg a poláris területeken 220 méterenként (azaz 0,45 °C/100 m a vertikális hőmérsékleti gradiens átlagos értéke). A horizontális és vertikális hatásokat összegezve azt kapjuk, hogy bolygónk leghidegebb régiói az Antarktiszon és Grönlandon találhatók, ahol az alacsony besugárzás mellé a vastag jégtakarók miatt nagy tengerszint feletti magasság társul.

A poláris területek tengerszintre vonatkoztatott éves átlaghőmérséklete -15 °C körül alakul. A sarkvidékeken a leszálló légmozgás és a hideg levegő alacsony víztartalma miatt kevés csapadék hullik. Míg a déli sarkkör éghajlatánál túlnyomórészt az Antarktisz szárazföldi jégtakaróját kell vizsgálnunk, addig az északi félteke nagyobb változatosságot mutat. Grönland szárazföldi jégtakarója mellett foglalkoznunk kell Észak-Amerika és Eurázsia tajga és tundra éghajlatával, valamint a Jeges-tengert borító jég változásaival. A Jeges-tenger, valamint a környező tengerek tetején lebegő jég éves periodicitást mutat. Március közepétől szeptember közepéig a jég szezonálisan összezsugorodik. Ahogy az Északi-sarkvidék hőmérséklete ősszel és télen csökken, a jégtakaró ismét növekszik, amíg el nem éri az éves maximumát, jellemzően márciusban. Az antarktisi kontinens körüli tengeri jég gyűrűje hasonlóképpen viselkedik, de az évszakok a déli félgömbnek megfelelően módosulnak: általában szeptemberben éri el a maximumát és februárban a legkisebb értéket. Ezekkel az ingadozásokkal a következő alfejezetben részletesen is foglalkozom.

A mai egyik legelfogadottabb szárazföldi éghajlati besorolás Vladimir Köppen klimatológus nevéhez fűződik, aki éghajlati rendszerét 1884-ben hozta létre, és több módosítás után 1936-ban nyerte el végleges formáját. Később Rudolf Geiger is végzett finomításokat a felosztáson, így az osztályozást Köppen-Geiger rendszernek is nevezik (Péczely, 1979). Az osztályozási rendszer öt fő éghajlati öveget határoz meg (A, B, C, D, E), amelyeken belül további alcsoportokat határozhatunk meg. A fő éghajlati övezetek az alábbiak: trópusi éghajlat (A), száraz éghajlat (B), meleg-mérsékelt éghajlat (C), boreális (hideg-mérsékelt) éghajlat (D), valamint poláris és magashegyi éghajlat (E). A legutolsó kategória tovább bontható ET, EF és EH alosztályra, megkülönböztetve a fagyott és a

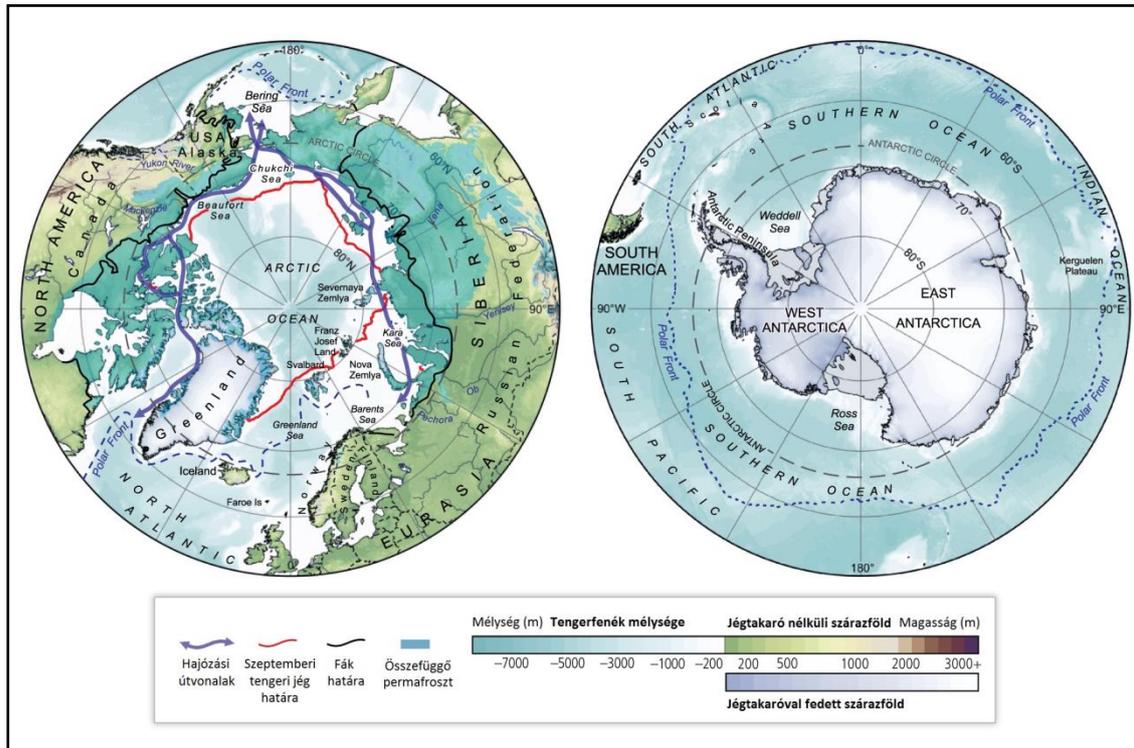
magashegységi éghajlatot. Az osztályozás erőssége, hogy követi a növényzet és a talaj övezetes eloszlását, de pontos elkülönítésük számszerűen rögzített kritériumok alapján, a hőmérséklet és a csapadék éves és évszakos változását követve valósul meg. Ennek alapján a sarkvidékekre jellemző (E) kategóriát szinte állandó jég jellemez. A legmelegebb hónap hőmérséklete sem haladja meg a  $<10\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ot és a hőmérséklet csupán 1-4 hónapig van fagypont felett. Kialakulásában a világos évszakban az alacsony napmagasság, télen rövid vagy teljesen hiányzó nappal játszik szerepet. A magashegységeket a tengerszint feletti magasságból eredő hideg levegő jellemez (kb.  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  mértékű vertikális irányú hőmérséklet-csökkenés). A poláris és magashegységi éghajlatú területek aránya a Föld területének 19%-át teszik ki.

A tundra (ET) éghajlatot rövid nyári vegetációs időszak jellemez. A legmelegebb hónap középhőmérséklete  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  és  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  között alakul. A lehulló csapadék mennyisége meghaladja a párolgást. A hóborítottság 8-10 hónapig át jelentkezik (példák: Iqaluit (Kanada), Providenyija (Oroszország), Nuuk (Grönland, Dánia), Barrow (Alaszka, Amerikai Egyesült Államok). Az állandó fagy éghajlatán (EF) a legmelegebb hónap középhőmérséklete sosem emelkedik fagypont fölé és a lehulló csapadék itt is meghaladja az alacsony párolgás mértékét (példák: Scott Base (Antarktisz), Eismitte (Grönland, Dánia). A magashegyi éghajlatot (EH) nagy tengerszint feletti magasság és szintén alacsony, fagypont alatti hőmérséklet jellemzi.

### **4.3. Az Arktisz és az Antarktisz földrajzi jellemezése**

A sarkvidéki régiók alatt tehát az Északi- és a Déli-sark körüli jeges területeket értjük, azonban a Föld két féltékeje jelentős eltéréseket mutat. Az Arktisznak az északi sarkkörön túli területeket nevezzük, míg az Antarktiszon magát az Antarktisz kontinenst, a Déli-óceánt ( $60^{\circ}$  déli szélességi kör és az Antarktisz közötti vízterület) és a szubantarktikus szigeteket értjük (7. ábra). Az Arktiszt definiálhatjuk egy szárazföldekkel körülvett, fagyott óceánnak, mivel nagy részét a Jeges-tenger és annak beltengerei teszik ki (ld. Függelék, F.1. ábra), míg az Antarktisz ennek az inverze, egy óceánnal körülvett, fagyott kontinens. Az elmúlt 100 évben az arktikus térség átlaghőmérsékletének növekedési üteme a globális átlagnak majdnem kétszerese volt (IPCC 1997). Azokon a helyeken, ahol a sokéves átlag fagypont körüli, jelentős fizikai és ökológiai változások várhatók. Az északi poláris jégsapka kiterjedése folyamatosan csökken és a jéggel borított kontinentális területeket szárazföld

váltja fel. Ezek együttes olvadása hozzájárul a globális tengerszint-emelkedéshez. A két pólus összehasonlításával a további alfejezetekben részletesebben is foglalkozom.

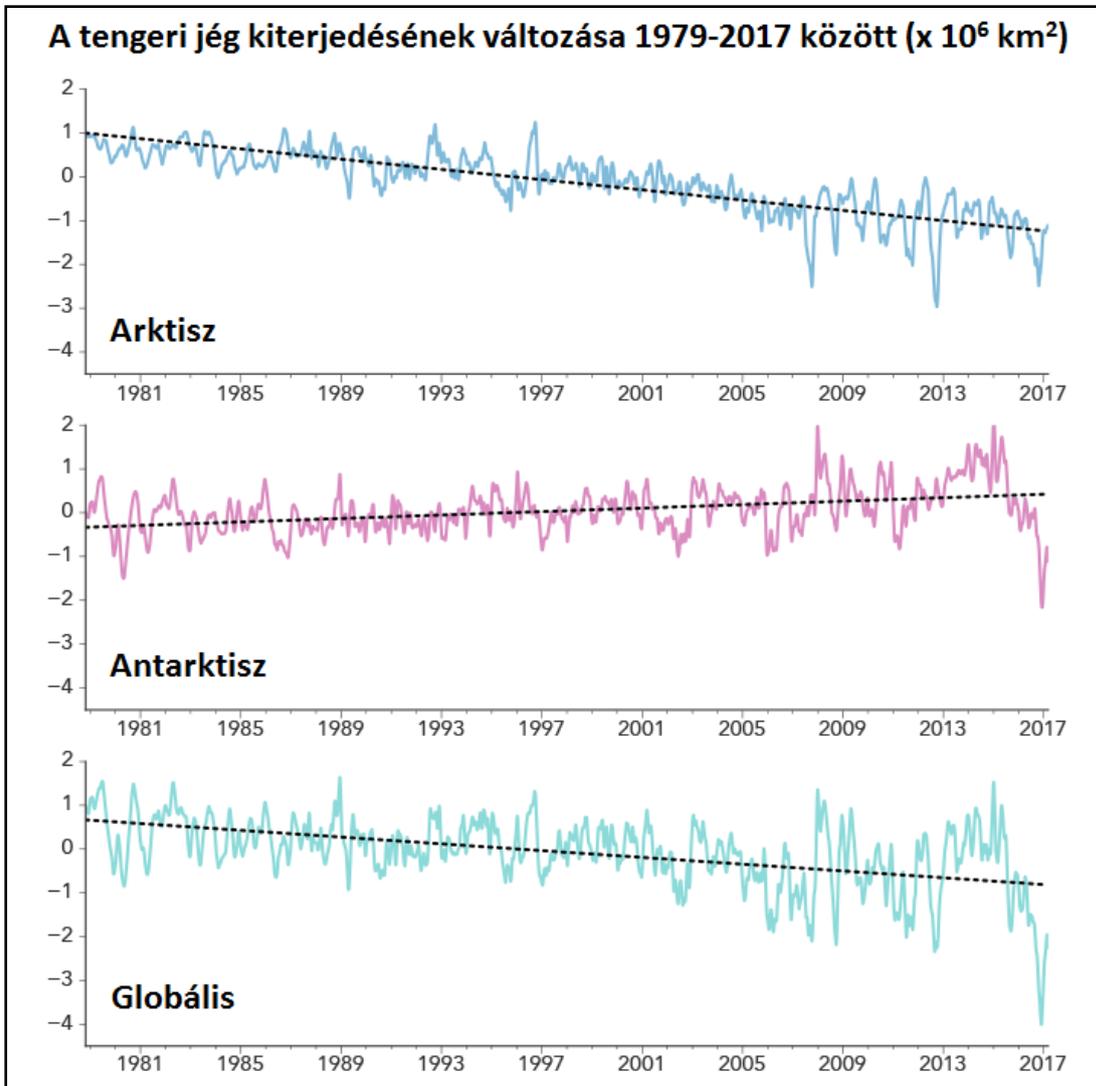


7. ábra: A bal oldali térkép az Északi-sarkvidéket, míg a jobb oldali térkép az Déli-sarkvidéket mutatja be. (forrás: IPCC 2014)

#### 4.4. Az Arktisz és az Antarktisz tengeri jégborítottsága

Az elmúlt évtizedben a Jeges-tengeren úszó tengeri jég területe negatív mélyponton volt, míg az Antarktisz körüli jég kiterjedése növekedése új csúcsokat ért el (Parkinson, 2014), azonban az elmúlt évek a déli póluson is változást hoztak, amelyet a 8. ábrán lévő grafikonok illusztrálnak. 2016 novemberében a globális tengeri jég nagysága messze átlag alatti értéket ért el. A kiterjedés az év nagy részében 1-2 millió  $\text{km}^2$ -rel az 1979-2015-ös átlag alatt mozgott, azonban novemberben több, mint 4 millió  $\text{km}^2$ -re nőtt az anomália, mielőtt enyhe növekedés következett volna be decemberben (WMO 2017). A műholdas mérések 35 éves adatainak átlaga szerint a globális havi szélsőértékek 18,2 millió  $\text{km}^2$  (február) és 26,6 millió  $\text{km}^2$  (november) között változtak (Parkinson, 2014). A 2017-es év eleje különösen említésre méltó amiatt, hogy szinte ugyanabban az időpontban dőltek meg a két sarkkör rekordjai. A NASA és az NSIDC közös mérései alapján február 13-án a két

pólus összesített tengeri jég adatai a legalacsonyabbak voltak a műholdas mérések kezdete óta. A teljes poláris tengeri jég-borítottság 16,21 millió km<sup>2</sup> volt, ami 2 millió km<sup>2</sup>-rel kisebb, mint az 1981-2010 közötti globális minimum-átlag (NASA 2017).



8. ábra: A műholdas mérések alapján mért tengeri jég kiterjedésváltozások az 1979-2017 időszakban. (forrás: Joshua Stevens/NASA Earth Observatory 2017)

Műholdas mérések szerint 2017. március 3-án az Antarktisz körüli tengeri jég a műholdas mérések kezdete óta a legalacsonyabb nyári végi minimumát érte el (9. ábra), amely meglepő megfigyelés az elmúlt évek mérsékelt növekedése után. A jég legkisebb nyári kiterjedése 2,11 millió km<sup>2</sup> volt, ami 184 ezer km<sup>2</sup>-rel alacsonyabb, mint a korábban a műholdak által mért legkisebb minimális kiterjedés, amelyet 1997-ben detektáltak. 2016-ban az antarktisi tengeri jég korán elérte maximális kiterjedését, amit szeptemberben gyors

veszteség követett. November óta a tengeri jég naponta döntötte meg a megelőző rekordokat, majd a jégveszteség februárban lelassult. A jelenség azért érdekes, mert két évvel korábban hónapokon keresztül rekordokat döntött az Antarktisz jegének maximális (!) kiterjedése. Ez a hirtelen átbillenés éghajlati léptékben nagyon gyors változásnak számít. Felvetődik a kérdés, hogy változás állt-e be a trendekben? A trendek évtizedek óta a mérsékelt növekedést mutatták, így csak a későbbi évek adatai alapján lehet meghatározni, hogy egy esetleges ugrás következett-e be a trendekben vagy sem (NASA 2017). Fontos megjegyezni, hogy bár a tengeri jégtakaró 1979 és 2013 között kiterjedt a Déli-óceán nagy részén, már eddig is jelentősen csökkent a Bellingshausen- és Amundsen-tengereken. Ez a két tenger az Antarktisz-félsziget közelében helyezkedik el, amely régió az elmúlt évtizedekben jelentősen felmelegedett (Parkinson, 2014).



9. ábra: Tengeri jég-borítottság műholdképe az Antarktisz kontinens körül 2017. március 3-án. Forrás: NASA Goddard's Scientific Visualization Studio/L. Perkins

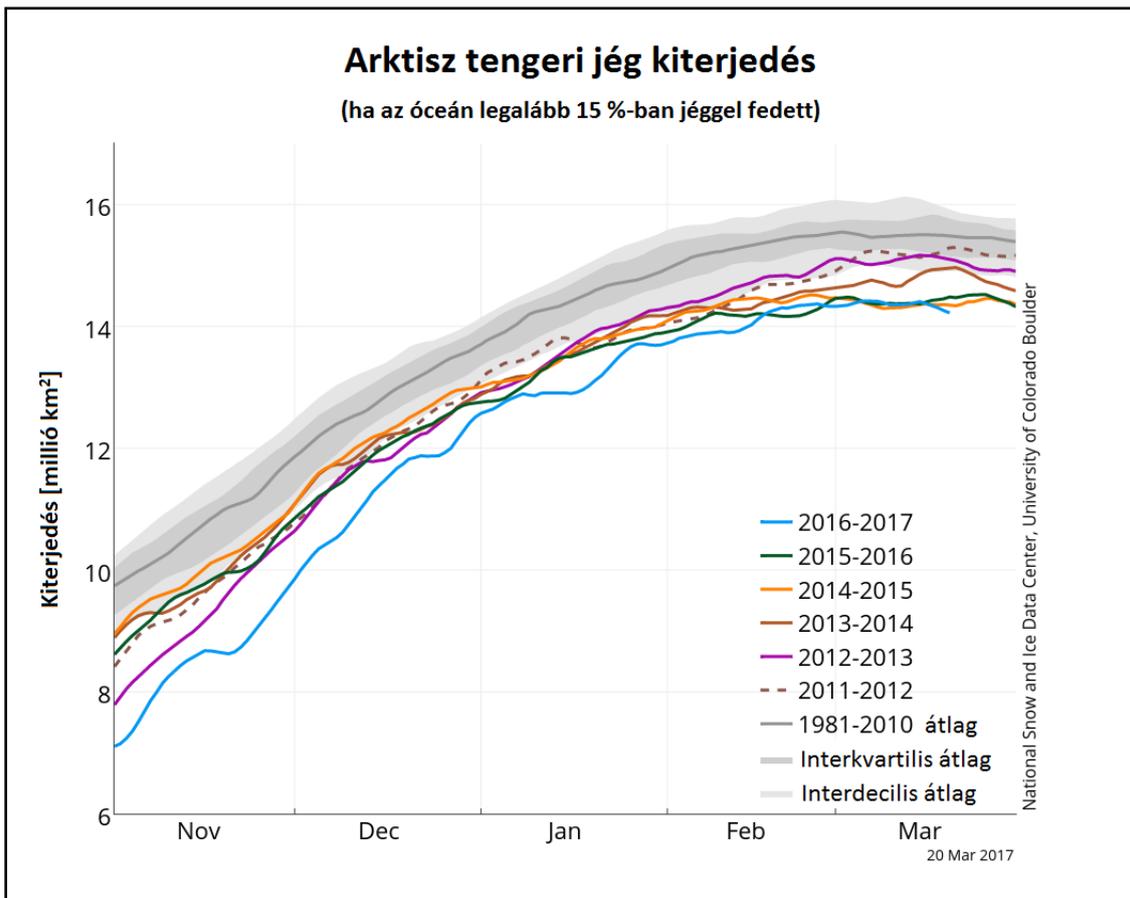
Az Arktiszt ezen a télen az átlagosnál melegebb hőmérsékletek, kedvezőtlen szelek és viharok jellemezték, amelyek sorozata megállította a tengeri jégnövekedést. Az Északi-sarkvidék téli legnagyobb tengeri jég-kiterjedése 2017. március 7-én (10. ábra) 14,42 millió km<sup>2</sup> volt, amely 97 km<sup>2</sup>-rel kevesebb az eddigi rekordot jelentő 2015-ös évnél, és 1,22 millió km<sup>2</sup>-rel marad el az 1981-2010 közötti átlagos maximumtól.



10. ábra: Az Arktisz téli legnagyobb tengeri jég-kiterjedése 2017. március 7-én  
(Forrás: NASA Goddard's Scientific Visualization Studio/L. Perkins)

Az északi sarkkör tengeri jege 1979 óta – amióta műholdas mérések monitorozzák a tengeri jeget – évtizedenként 2,8%-kal csökkent (11. ábra). A legnagyobb változás a nyári minimumoknál tapasztalható, ahol a veszteségek közel ötször nagyobbak: évtizedenként 13,3% (Meier, 2017). A tengeri jégtakaró zsugorodásának következtében az óceáni vizek egyre érzékenyebbé válnak a szél és a melegebb hőmérséklet hatására. A jelenlegi téli szélsőértékek nem feltétlenül vezetnek újabb nyári minimum rekordokhoz, mivel az olvadás nagyban függ a később időjárástól (NASA 2017). Ha figyelembe vesszük az Arktisz belső éghajlatának változékonyságát az 1979-2013-as időszakban, akkor a tengeri jég-kiterjedés megfigyelt és várt tendenciái nem ellentmondásosak. A belső változékonyság akár évtizedekig is elfedi vagy fokozza az ember által kiváltott változásokat. Az, hogy az egyértelmű csökkenő tendencia ellenére időről-időre szünetek figyelhetők meg a jégzsugorodásban, nem meglepő (Swart *et al.*, 2015).

A 35 éves adatsorok vizsgálata során klimatológusok kimutatták, hogy az Antarktisz körüli növekedések nem pótolják az elmúlt évtizedek felgyorsult sarkvidéki jégvesztéseit. A Föld évente átlagosan 35 000 km<sup>2</sup>-t veszít a jégborítottságából. A globális tengeri jégvesztés felgyorsult. Míg 1979 és 1996 között a jégvesztés évente 21 500 km<sup>2</sup> volt, ez az arány 1996 és 2013 között évente 50 000 km<sup>2</sup> (Parkinson, 2014). Parkinson azt is megállapította, hogy a globális jégmennyiség éves ciklusa jobban megfelel az antarktisi jég éves ciklusának, mint az Északi-sarkvidékének (8. ábra).



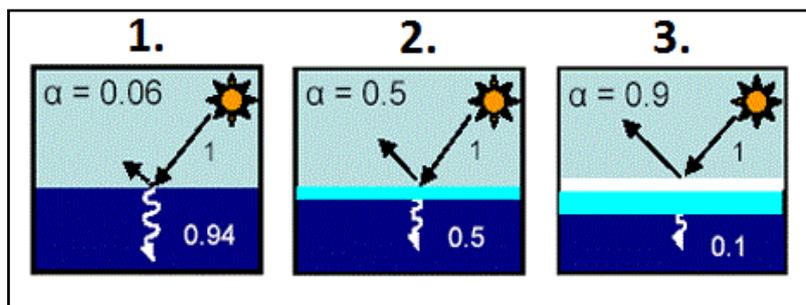
11. ábra: Az Északi-sarkvidék tengeri jég-kiterjedése 2017. március 20-án az elmúlt 5 év napi felbontású meteorológiai adatai alapján. (forrás: NSIDC 2017)

A globális minimális jégmennyiség februárban jelentkezik, ugyanúgy, mint az Antarktisz minimális kiterjedése. A globális maximális tengeri jég mértékét viszont októberben vagy novemberben, az antarktisi maximum után egy-két hónapon belül mérik. Ehhez képest eltérést mutat az Északi-sark minimuma (szeptember) és a maximuma (március). Az északi poláris jégsapka megléte vagy teljes elolvadása egy kritikus pont az éghajlati rendszer állapotában. Ha átbillen az egyensúly, akkor éghajlati léptékben mérve nagyon rövid idő alatt a mostanitól teljesen eltérő állapotba kerülhet (Götz, 2005). A földtörténetben a glaciális-interglaciális átmenetek során már többször előfordult ilyen állapot.

Modellszámítások igazolják, hogy az utóbbi évek szélsőséges eseményei az antropogén hatásoknak tulajdoníthatók (Kirchmeier-Young et al., 2017).

## 4.5. Az albedó szerepe a tengeri jég olvadásában

Az albedó egy dimenzió nélküli mennyiség, ami egy adott felület fényvisszaverő képességét jelenti, azaz hogy egy adott felszín milyen mértékben tudja visszaverni a beérkező napsugárzást. Az albedót egy 0 és 1 közötti értékkel (vagy százalékos formában) adjuk meg. A 0 érték azt jelenti, hogy egy felület teljesen elnyeli az összes bejövő elektromágneses sugárzást. Az 1 érték tökéletes visszaverőként viselkedik, azaz minden bejövő sugárzást visszatükröz. A Föld átlagos albedója 0,39. A tengeri jég sokkal magasabb albedóval rendelkezik, mint más felszínek, például a környező óceán. Az óceán albedója nagyon alacsony, kb. 0,06, míg a csupasz tengeri jég albedója 0,5 és 0,7 között változik. Ez azt jelenti, hogy az óceán a beérkező napsugárzás csupán 6%-át veri vissza, a többit elnyeli, míg a tengeri jég a bejövő energia 50-70%-át is képes visszatükrözni. A tengeri jég a reflektált energia következtében megtartja felülete hűtését [9 - NSIDC].



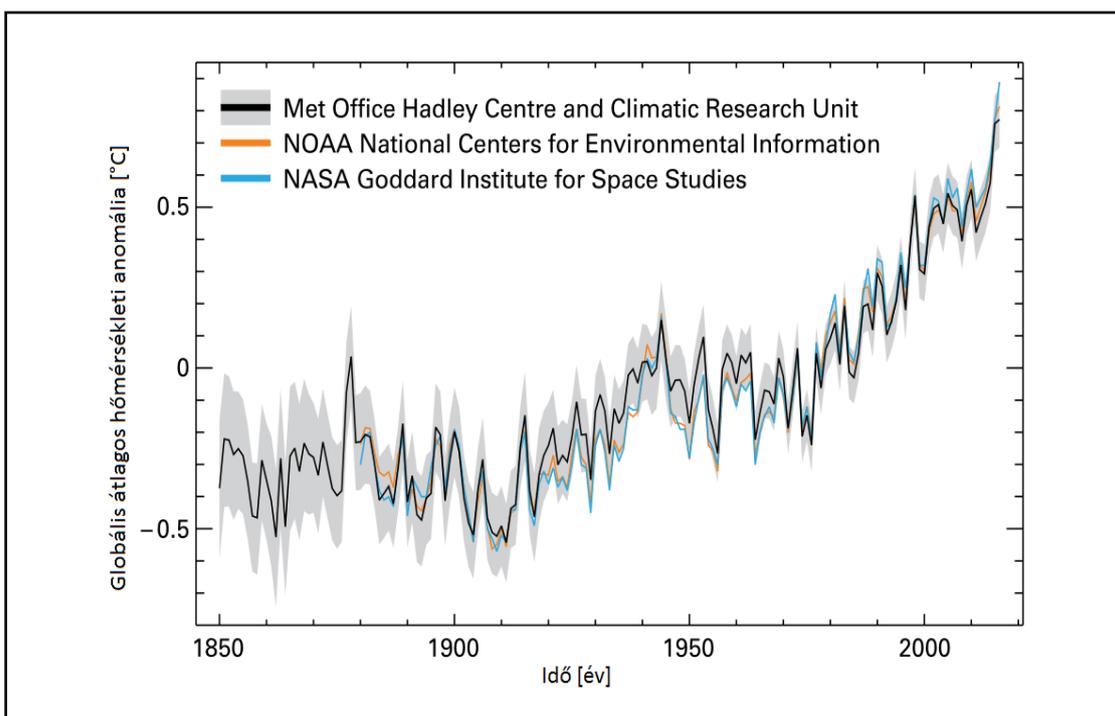
12. ábra: A különböző felületek albedója:  
1. nyílt óceán, 2. csupasz jég, 3. hóval fedett jég.  
(forrás: NSIDC)

A havas területek még magasabb albedóval rendelkeznek, mint a csupasz jég, ezért a vastag, hófödte tengeri jég akár a beérkező napsugárzás 90%-át is tükrözi. Ez egyfajta szigetelőként szolgál, segít az alacsony hőmérséklet fenntartásában és késlelteti a nyári jégolvadást. Miután a hó kezd elolvadni, sekély tavak jelennek meg a felszínen, amelyek albedója kb. 0,2-0,4, ezért mindent egybevetve a felszín teljes albedója kb. 0,75-re csökken (12. ábra). Ahogyan az olvadt tavak egyre mélyülnek és kiterjedésük egyre nő, az albedó egyre csökken, akár 0,15-re is módosulhat. Mivel az olvadéktavak nagyobb energiaelnyeléssel rendelkeznek, ennek eredményeképpen felgyorsítják az olvadást (NSIDC 2017). Érdeemes megjegyezni, hogy a poláris vizekben egyre gyakrabban megfigyelhető

algavirágzás is megváltoztatja a tengervíz albedóját és szintén hozzájárul a felmelegedéshez. Továbbá különbséget teszünk frissen hullott hó és régi hó között. Mind a tengeri jég esetében, mind a szárazföldi hótakarónál (pl. Grönland) igaz, hogy az egyre gyorsuló olvadás hatására a hó albedója csökken, és ezáltal egy öngerjesztő folyamat jön létre.

## 4.6. A Föld globális felszínközeli léghőmérséklete

Az antropogén tevékenység okozta globális hőmérsékletnövekedés nélkül egyáltalán nem fordulhatott volna elő, hogy az elmúlt 150 év 15 legmelegebb évéből 13 év a 2000-2014 közötti időszakban következzen be (Mann *et al.*, 2016). Mivel az azóta eltelt 2 év szintén rekordot hozott, ezért most már elmondható, hogy az időjárási feljegyzések kezdete óta a 17 legmelegebb esztendőből 15-öt a XXI. században detektáltak (13. ábra).

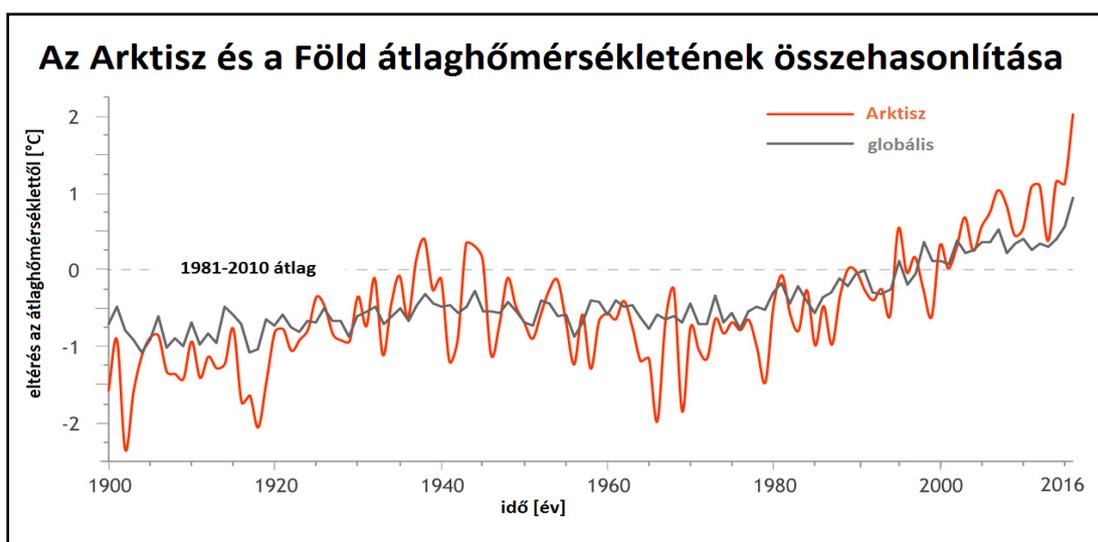


13. ábra: Globális átlagos hőmérsékleti anomáliák az 1961-1990 referenciaidőszakhoz viszonyítva három különböző forrású adatsor felhasználásával. A szürke árnyalat az adatsorok bizonytalanságát jelzi. (forrás: UK Met Office Hadley Centre, 2017)

Klímakutatók számításai szerint minimális, csupán 0,01% az esélye annak, hogy az elmúlt évek globális hőmérséklet-rekordjai az éghajlat természetes fluktuációjának

következményei (Mann et al., 2016). Mann és munkatársai (2016) tanulmánya olyan statisztikai elemzésekre hivatkozik, amelyekben összehasonlították a megtörtént időjárási megfigyeléseket és az éghajlatrendszer széleskörű számítógépes modellezését, így a klíma természetes változékonysága és az ember okozta klímaváltozás elkülöníthetővé vált.

Az IPCC (2013) jelentése szerint az évi globális középhőmérséklet 0,89 °C-kal növekedett az 1901 és 2012 közötti időszakban. Az elmúlt három évtized mindegyike melegebb volt, mint az azt megelőző évtizedek 1850 óta. Becslések szerint az északi hemiszférán az 1983-2012-ig tartó periódus a legmelegebb 30 éves időszak az utolsó 1400 évben. Ekkor a globális felszínhőmérséklet értéke 14,47 °C volt (IPCC 2013). Korábban visszatekintve a 2010-es év fontosságát jelzi, hogy a globális középhőmérséklet az 1998-as és 2005-ös évekhez hasonló rekordokat ért el (Pongrácz et al., 2013). Így a XXI. század első évtizede a valaha volt legmelegebb dekáddá lett (14. ábra).



14. ábra: Az Arktisz és a földi átlagos melegedése összehasonlítása.  
(forrás: NOAA Climate.gov 2017)

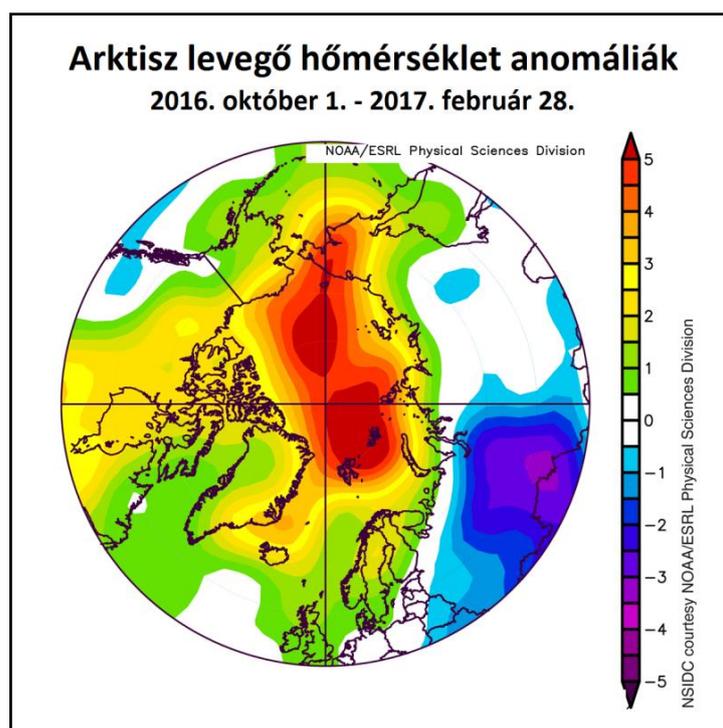
Modellszámítások szerint (IPCC 2013) a következő 20 évben a Föld átlaghőmérséklete valószínűleg további 0,3-0,7 °C-kal fog emelkedni. A XXI. század végén, a 2081-től 2100-ig tartó 20 éves időszakban várhatóan 1,5 °C-kal – sőt, akár 2 °C-kal is – átlépheti a globális átlaghőmérséklet az iparosodás előtti értéket. A melegedés üteme nagyban függ a későbbi üvegházgáz-kibocsátás mértékétől.

A Meteorológiai Világszervezet által évente kiadott éghajlati értékelésben is hasonló tendenciákat fogalmaztak meg: a legfrissebb mérési adatok alapján az iparosodás óta a Föld

átlaghőmérséklete a 2016-os évben volt a legmagasabb, tehát 2014 és 2015 után ismét rekord anomáliát regisztrálhattunk. Ezzel a rendszeres műszeres mérések kezdete óta 2016-ig immáron 1,1 °C-ot növekedett a globális középhőmérséklet (WMO 2017). A számítások szerint összességében a felszínközeli léghőmérséklet globális átlaga 0,83 ( $\pm 0,1$ ) °C-kal haladta meg az 1961–1990 referencia-időszak átlagát. (A földi átlaghőmérséklet becslése természetesen bizonytalansági határokkal lehetséges.) A legnagyobb mértékű anomáliákat a pólushoz közeli, magas földrajzi szélességeken regisztrálták (15. ábra).

## 4.7. Az Arktisz hőmérsékleti anomáliái

A WMO (2017) jelentése szerint a 2016/2017 télen háromszor érte el hőhullám az Északi-sarkvidéket.



15. ábra: Az északi-sarkvidéki levegő hőmérsékleti anomáliái a 925 hPa szinten °C-ban kifejezve 2016. október 1. és 2017. február 28. között. (forrás: NSIDC/NOAA Earth System Research Laboratory Physical Sciences Division)

Nagy erejű atlanti viharok meleg, nedves levegőt szállítottak a térségbe, így a jég újraképződésének kritikus időszakában előfordultak olvadásponthoz közeli hőmérsékletek

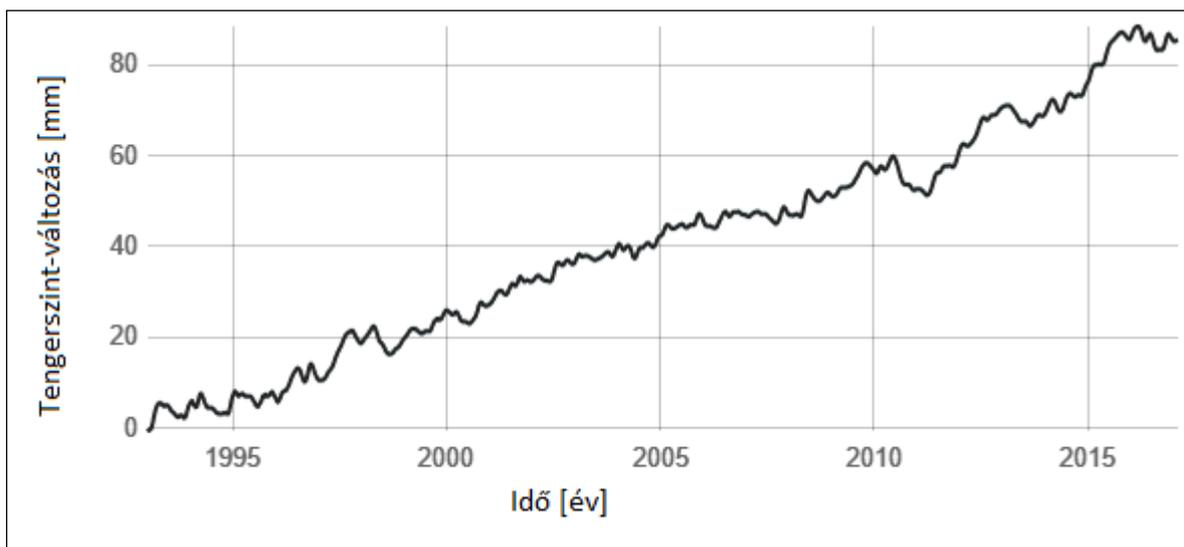
(WMO 2017). A levegő hőmérséklete a 925 hPa-os szinten (azaz kb. 700 m tengerszint feletti magasságban) a 2016 októberétől 2017 februárjáig terjedő 5 hónapos időszakban a teljes Jeges-tenger felett 2,5 °C-kal meghaladta a sokéves átlagot, míg a Csukcs- és a Barents-tenger térségében több, mint 5 °C-os anomáliát regisztráltak. A Spitzbergákon (Norvégia) 6,5 °C-kal volt melegebb az 1961-1990 közötti időszak átlagához viszonyítva (NSIDC 2017). A 2017-es téli anomáliák a 15. ábrán figyelhetők meg. A sárga és a vörös színek magasabb hőmérsékletet mutatnak, mint az 1981 és 2010 közötti átlag, míg a kék és a lila árnyalatok a 1981 és 2010 közötti átlagnál alacsonyabb hőmérsékletet jeleznek.

#### **4.8. A globális óceáni vízhőmérséklet, tengerszint-emelkedés**

Az IPCC ötödik helyzetértékelő jelentése (IPCC 2013) szerint nagy bizonyossággal állítható, hogy az óceánok felső rétege (700 m mélység felett) melegebb lett 1971 és 2010 között. Ehhez viszonyítva súlyosabb következményekkel jár, hogy a nehezebben átkeveredő mélyebb óceáni rétegek (3000 m mélység alatti) vízhőmérséklete valószínűleg szintén növekedett – a megfigyelések kezdetének számító – 1990-es évek óta. Ezek a megfigyelések igazolják, hogy az üvegházhatásból származó többletenergia nagy részét az óceánok tárolják. Az óceánok vize a légtömegekhez hasonlóan állandó mozgásban van. Az éghajlatot alakító tényezők közül a felső 50-150 m mélységű réteg a meghatározó, mivel a legnagyobb hőszállítás itt megy végbe, és ezért ez a felszínhez közeli réteg befolyásolja a felszíni hőmérséklet- és csapadék-eloszlást. A felső réteg áramlását az állandó globális légkörzés nagy mértékben meghatározza. A globális melegedés következtében az óceánok hőtágulása, a gleccserek, a tengeri és a szárazföldi hó/jég olvadása, valamint az extrém erős El Niño hatására az 2017-es év elején rekord mértékű globális tengerszint-növekedés következett be (WMO 2017).

A tengerszint-emelkedés üteme az 1850-es évek óta nagyobb, mint az előző két évezred emelkedésének átlaga összesen (IPCC 2013). A XX. század kezdete óta az óceánok globális átlagos szintje 20 cm-t növekedett, ebből 8,5 cm-t a műholdas mérések kezdete óta (WMO 2017). A folyamat a műholdas adatok alapján 1993 és 2010 között gyorsuló tendenciát mutat (16. ábra). A Jason-1 és a Jason-2 műhold mérései szerint a globális tengerszint növekedés jelenlegi üteme 1993 január és 2009 szeptembere között  $3,3 \pm 0,4$  mm/év. A 2004-2008 időszakra vonatkozó korábbi becslések még ennél kisebb

mértékű,  $2,0 \pm 0,4$  mm/év tendenciát jeleztek (Beckley et al., 2010). Az éghajlati becslések (Carson et al., 2016) szerint hasonló trend várható a XXI. században is. A hó az óceán mélyebb rétegeit is eléri, ami hatással lesz a globális óceáni cirkulációra is. Az IPCC helyzetértékelő jelentése (IPCC 2013) kiemeli, hogy az előző interglaciális időszak alatt a globális tengerszint 5-10 m-rel haladta meg a jelenlegi értéket, és a globális átlaghőmérséklet az ipari forradalom előttihez képest  $2$  °C-kal magasabb volt.



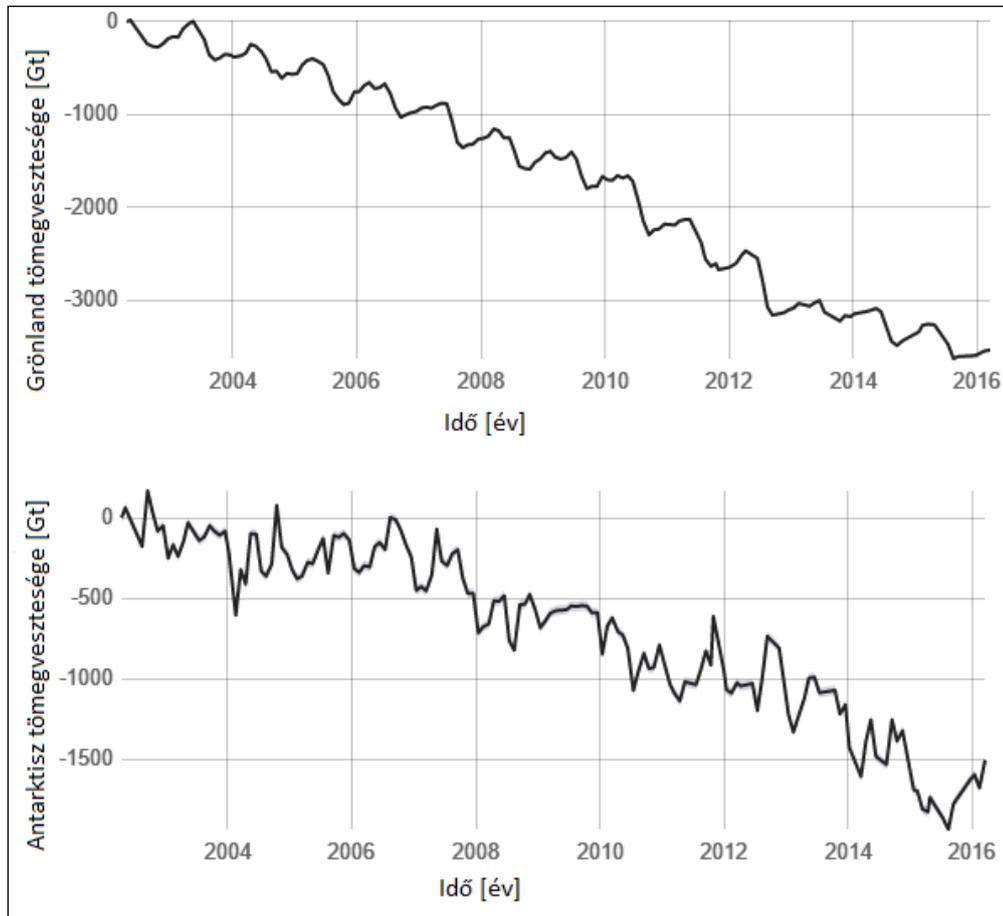
16. ábra: A globális tengerszint-változás, 1993-2016.  
A detektált emelkedés üteme  $3,3 \pm 0,4$  mm/év.  
(forrás: NASA Goddard Space Flight Center)

Az iparosodás kezdete óta a tengervíz savasabbá vált, a pH érték globális átlagban 0,1-del csökkent. A tengervíz pH értéke manapság 7,5 és 8,4 között mozog. A savasodó tendencia a megnövekedett CO<sub>2</sub> kibocsátás miatt várhatóan a XXI. században is folytatódik (IPCC 2013). A melegedő és savasodó óceánok miatt a trópusi vizekben nagy kiterjedésű korallpusztulást észleltek (WMO 2017).

## 4.9. Grönland jégtakarója

A múlt éghajlatának megismeréséhez az egyik legjobb lehetőséget a sarkvidéki területeket fedő jégtakaróból vett jégfuratok adják. A jégmintákba zárt levegőbuborékok <sup>18</sup>O-izotópjából a fák évgyűrűihez hasonlóan rétegenként következtethetünk az elmúlt korok hőmérséklet-tendenciáinak alakulására. A több kilométer vastag jégfuratok részletes

elemzése 100-800 ezer éves periódust is lefedhet. A fúratelemzés az egyetlen módszer, amellyel ilyen hosszú adatsorokat tudunk előállítani a Föld korábbi éghajlatáról. A minták az éghajlat mellett a por, a vulkanikus hamu, a tengeri só-, illetve a pollenkoncentrációkról is adnak információt (Bartholy és Pongrácz, 2013).



17. ábra: Grönland és az Antarktisz jégpáncéljának tömegvesztései a 2002 és 2016 között a NASA műholdas mérései alapján. (forrás: GRACE/NASA 2017)

A Földön két helyen található több kilométer vastagságú jégpáncél, amelyek az utolsó eljegesedési időszakból maradtak vissza. Míg északon Grönland 90%-os jégborítottsága 1500-3000 m vastagságú, addig az Antarktisz 99%-os lefedettsége helyenként több, mint 4,5 km vastagságú. A krioszféra kutatásokból már több, mint egy évtizede tudjuk, hogy a Nyugat-Antarktisz jégtakarója jelentősebb tömegeket veszít és hozzájárul a tengerszint emelkedéséhez (Zwally et al., 2015). A Martin-Español et al. (2017) műholdas adatokat, gravimetrikus jellemzőket és geofizikai folyamatokat vizsgálva szintén arra a következtetésre jutott, hogy a 2003-2013 időszakban az Antarktisz egésze is

hozzájárult a tengerszint-növekedéséhez. Számításaik alapján azonban a kelet-antarktiszi felhalmozódó jégmennyiség mintegy háromszor-ötször kisebb volt annál, mint amit *Zwally et al.* (2015) korábban becsült.

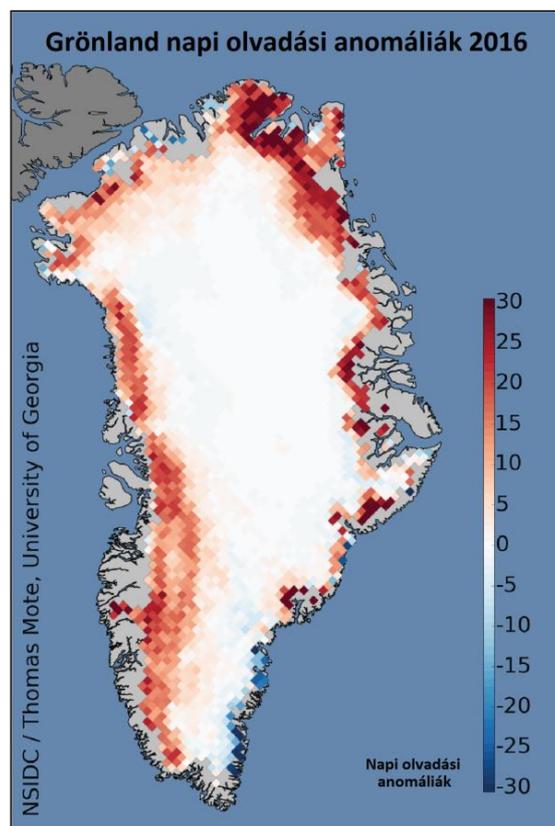
Grönland esetében a délnyugati és az északkeleti területek jégmentesek. A grönlandi jégtakaró összterülete kb. 1,8 millió km<sup>2</sup>, amelynek vastagsága folyamatosan csökken. Ez a csökkenő trend folyamatosan észlelhető a 2002-es műholdas mérések kezdete óta (17. ábra). A NASA GRACE<sup>39</sup> műholdjának adatai azt mutatják, hogy a déli kontinens 2002 óta kb. 118 ± 44 Gt jeget veszít évente, míg a grönlandi jégtakaró évi 281 ± 24 Gt-val csökkent (NASA 2017). A műholdas mérésekből készült grafikonokat – mindkét pólus esetén – a 17. ábrán láthatjuk. Grönland esetében a csökkenő trend erős periodikus szabályosságot követ, míg az Antarktison kisebb ingadozások figyelhetők meg, ám a csökkenő trend itt is egyértelmű.

Az NSIDC megfigyelései szerint 2016-ban a jégtakaró olvadásának kezdete a második legkorábbi volt a megfigyelések teljes 37 éves intervallumában, közel a 2012-es rekordhoz. Az olvadás április 2. és 4. hetében kezdődött Délnyugat-Grönlandon. A legnagyobb jégvesztéséget – a 2015-ös évhez hasonlóan – a nyugati és az északkeleti területeken detektáltak (18. ábra). A Helheim és a Kangerdlugssuaq gleccser közelében fekvő keleti és délkeleti partok mentén néhány lokális területen gyakori olvadás mutatkozott, ami fokozta a jég visszahúzódását. A közép-nyugat-grönlandi partvidék mentén jellemző sötét jég szintén a Helheim és a Kangerdlugssuaq gleccser közelében jelent meg. Az öregedő „jégfelszín” magasabb albedója miatt az olvadás még inkább felgyorsul, mivel több napsugárzást képes elnyelni. A jég fogyása a kritikus nyári évszakban a legnagyobb. 2016-ban a nyári olvadás mértéke ritkán volt az 1981-2010 időszak átlaga alatt. A negatív rekord július 19-én volt mérhető, amikor a passzív mikrohullámú sávban végzett mérések alapján a jégtakaró felületének 43%-a volt egyidejűleg olvadásban. Növekedés leginkább csak a délkeleti partvidéken volt megfigyelhető. A 2016-os teljes nyári (június, július, augusztus) olvadási terület 36 millió km<sup>2</sup> volt, ami a tizedik legnagyobb az 1978 és 2015 közötti időszakban (a 2004-es évvel megegyezően). Annak ellenére, hogy az 1981 és 2010 közötti átlagos jégmennyiség szignifikánsan magasabb volt, az elmúlt évtizedben már inkább a 2016-os olvadási szezon volt jellemző a grönlandi nyarakra. Összehasonlítva a 2016-os olvadékterületet a három legnagyobb mértékű olvadási évvel (2012, 2010 és 2007) azt

---

<sup>39</sup> Gravity Recovery And Climate Experiment – Gravitációs mező felépülése és az éghajlat vizsgálata

tapasztaljuk, hogy míg tavaly a korai szezonban nagy volt az olvadás, addig július közepén a legmelegebb évekhez képest kissé lelassult. A grönlandi 2016-os napi olvadás területi anomáliája (azaz az 1981 és 2010 közötti napi átlaghoz viszonyított eltérés) naponta mintegy 90 000 km<sup>2</sup> volt. A grönlandi meleg nyár – jelentős part menti olvadással – átlagosan kisebb albedójú területekhez vezetett. A jéghez viszonyítva kisebb visszaverőképességgel rendelkező kiolvadó szárazföld és az öregedő jégfelszín miatt az alacsonyabb albedó területei gyakoribbak a nyugati part mentén. Elszigetelt foltokban az öregedő jégfelszín egyre újabb területeken jelentek meg a délkeleti partvidéken is. Tasiilaq falu közelében egy erős pozitív napi olvadási anomáliát figyeltek meg az említett folyamat következtében, és a legmelegebb nyarat mérték 1895 óta. A sziget déli csúcsához közeli Narsarsuaqnál szintén 2016-ban detektálták a legmelegebb nyarat 1961-től számítva, míg a dél-nyugati partvidéken található Nuuk-ban (Grönland fővárosa) a második legmelegebb nyarat regisztrálták 1873 óta.



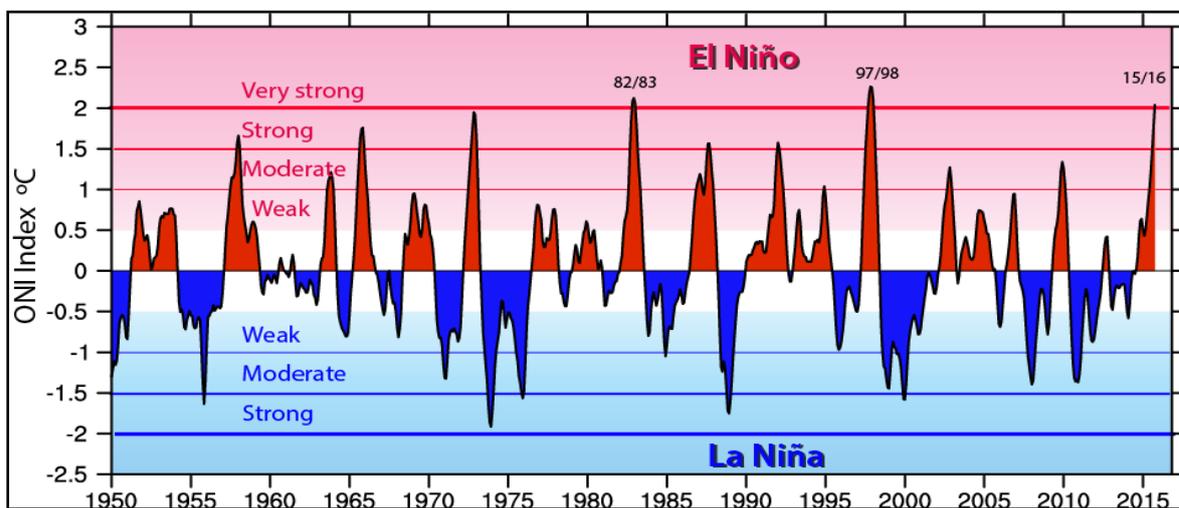
18. ábra: Az 1986 és 2010 közötti időszak átlagos olvadási napjainak számához viszonyított 2016-os anomália. (forrás: NSIDC/Thomas Mote 2017)

## 4.10. Egyéb érdekességek

Bizonyított tény (IPCC 2013), hogy a gleccserek tovább olvadnak és minden földrajzi szélességen tömegcsökkenés tapasztalható. A lehetséges forgatókönyvek szerint a XXI. század végére a gleccserek hossza 35-85%-kal csökkenhet. Az északi hemiszféra hótakarójának kiterjedése az 1950-es éves óta folyamatosan csökken (IPCC 2007a), a legnagyobb anomália tavasszal figyelhető meg. 2016 tavaszán rekord alacsony volt Észak-Amerikában a hótakaró kiterjedése és a mérések 1967-es kezdete óta először zsugorodott 3,9 millió km<sup>2</sup> alá (NOAA 2016).

Az Arktisz felmelegedése miatt az állandóan fagyos talaj – azaz a permafroszt – felengedése révén az északi szárazföldi területek is változni kezdenek: a talaj megsüllyed, a partvonalak töredeznek, illetve földrengések alakulhatnak ki (IPCC 2013). Az olvadó permafroszt megkötött CO<sub>2</sub>-t és CH<sub>4</sub>-t bocsájt a levegőbe, ezzel is fokozva az üvegházhatást.

Nemrégiben ért véget egy extrém erős El Niño fázis (19. ábra). Az 1982-83-as és az 1997-98-as évek után ez volt harmadik legerősebb ENSO jelenség (Trenberth, 2016). Ez a változó szabályosságot mutató éghajlati anomália az Arktiszon is éreztette hatását. Klímakutatók szerint a 2015/2016-os intenzív El Niño fázis nagy mértékben szerepet játszott abban, hogy az utóbbi években szinte mindenhol éghajlati rekordokat regisztráltak.



19. ábra: Az ENSO-t jellemző egyik index (Oceanic Niño Index, ONI) időszora: 1950-2016. A meleg (piros) és a hideg (kék) vízhőmérsékleti anomáliákat mutatja a Csendes-óceán trópusi térségében. (forrás: NCAR/Trenberth)

## 5. A detektált változások alátámasztása éghajlati adatsorok feldolgozásával

A korábbi fejezetekben már beláttuk, hogy az utóbbi évtizedekben megfigyelhető, egyre fokozódó globális hőmérsékletnövekedés a Jeges-tengeren lebegő tengeri jég éves, illetve évszakos kiterjedésének csökkenéséhez vezet.

Ebben a fejezetben a rendelkezésemre álló adatsort dolgoztam fel ezen állapotások igazolásához. Kutatásomban kizárólag a tengeri jég kiterjedésével foglalkozom. Fontos megjegyezni, hogy a jég életkora és vastagsága is lényeges információ, ugyanis a megfigyelések alapján az északi sarki tengeri jég egyre fiatalabb és egyre vékonyabb. A korszerű műholdas megfigyelések szerint az 1970-es évek óta a tengeri jég mintegy 50%-kal vékonyodott (*Meier, 2017*). Ha ez a folyamat az eddigiekhez hasonlóan zajlik tovább, akkor még a korábban becsülthöz képest is korábban eltűnhet az északi poláris jégsapka.

### 5.1. Felhasznált adatok és módszerek

Egy adott földrajzi terület – jelen esetben az Arktisz – éghajlati állapotának felméréséhez alapvető feltétel, hogy jó minőségű megfigyelések, megfelelően sűrű tér- és időbeli adatok álljanak rendelkezésünkre (WMO 2010). Éghajlati változások nyomon követéséhez a tendenciák ismerete is fontos. A lineáris trendfüggvények létrehozásánál 25, 50, 100, vagy akár 150 évre visszamenőleg is megadhatjuk az intervallumot. Növekedő trendeknél a trendegyüttható értékei rövidebb időtartamot tekintve egyre nagyobbak, az illesztett trendegyenesek meredeksége egyre nő (*Bartholy és Pongrácz, 2013*). A hosszú megfigyelési idősorok trendjeit kisebb időszakokra feldarabolva ugrásokat tapasztalhatunk (*Matyasovszky, 2012*). Az eltérések nemcsak időben, hanem térben sem egyenletesek. A térbeli adatok pontosabb megismeréséhez többféle mérési módszer és mérőállomás adatait kell egybevetnünk (*Lakatos et al., 2011*).

A szakdolgozat célkitűzése értelmében a szakirodalomban olvasható megállapításokat, következtetéseket az online rendelkezésre álló adatbázis (<http://arctic.atmos.uiuc.edu/SEAICE/>) alapján saját számításokkal (Java nyelven írt programokkal) és az ezekből levezethető eredményekkel is alátámasztom. Emellett arra is vállalkoztam, hogy az 1901-2005 közötti havi felbontású adatbázisból térképeket készítek.

A feldolgozásra került adatbázis az Északi-sarkvidék tengeri jégkoncentrációit tartalmazza, mely az alkalmazott rácshálózatra vonatkozóan havi felbontású mezőkből (*ld.*

*Függelék, F.2. ábra*) épül fel 1901 január és 2005 december között. A cellaterületekre meghatározott adatokat ASCII formátumban lehet letölteni a hozzájuk kapcsolódó részletes dokumentációval, melyet a megadott földrajzi szélességi és hosszúsági koordinátákkal azonosíthatunk be. A havi tengeri jégkoncentrációk egy Északi-sarki középpontú standard 1°-os rácshálón állnak rendelkezésre (hengeres vetület alkalmazásával) az északi félgömbre. A havi tömböket amerikai Illinois Egyetem kutatói készítették, több információforrás integrálásával, több adatbázis összegzésével (*Chapman és Walsh, 1991*). Minden egyes rácspont pontos forrását egy külön fájl tartalmazza. A mérési módszerek az évek során változtak: a mezősor elején a hagyományos észlelések, megfigyelések felhasználásával készültek el az adatsorok, majd a modern műholdas távérzékelte mérésekből határozták meg az adatsorokat definiált rácshálónak megfelelően. Az adatsorokban található hiányosságokat utólag pótolták klimatológiai elven alapuló származtatott adatokkal. A legtöbb 1953 előtti adat vagy általánosabb klimatológiai információk alapján készült, vagy interpolált adat, ezért ezek felhasználását fenntartásokkal kell kezelni. (A jég-kiterjedési megfigyeléseket csak az április és augusztus közötti időszakra végezték az 1901-1956 időszak túlnyomó részében.)

Az adatbázishoz tartozó fájlok:

*icecon.1901-2005.txt* – északi sarki tengeri jég-koncentráció adatai

*latlon.dat.txt* – földrajzi szélességi és hosszúsági koordináták adatai

*areagrid.dat.txt* – a rácspontok forrását tartalmazó adatsor

Az alábbiakban ezen állományok részletes bemutatása következik.

- I. fájl: *icecon.1901-2005.txt* – Arktisz tengeri jégkoncentráció összesen 1260 hónapra vonatkozóan

Ez a fájl tartalmazza a hengeres vetületen téglalap alakú, egyenlő területű rácshálózaton megadott havi felbontású tengeri jég koncentrációkat. A rendelkezésre álló interpolált mezők a hónapok utolsó napjára vonatkoznak. Megjegyzendő, hogy sok havi felbontású adatbázis ettől eltérően nem a hó végi értékeket, hanem havi átlagokat tartalmaznak.

A jégkoncentráció értékeket ASCII karakterek adják meg, ahol a számok a tizedben kifejezett jégborítottságot jelentik minden egyes rácscellára vonatkozóan. A rácscellák mérete 1°, azaz 60 tengeri mérföld (1 *tengeri mérföld* pontosan 1852 m, azaz 1,852 km).

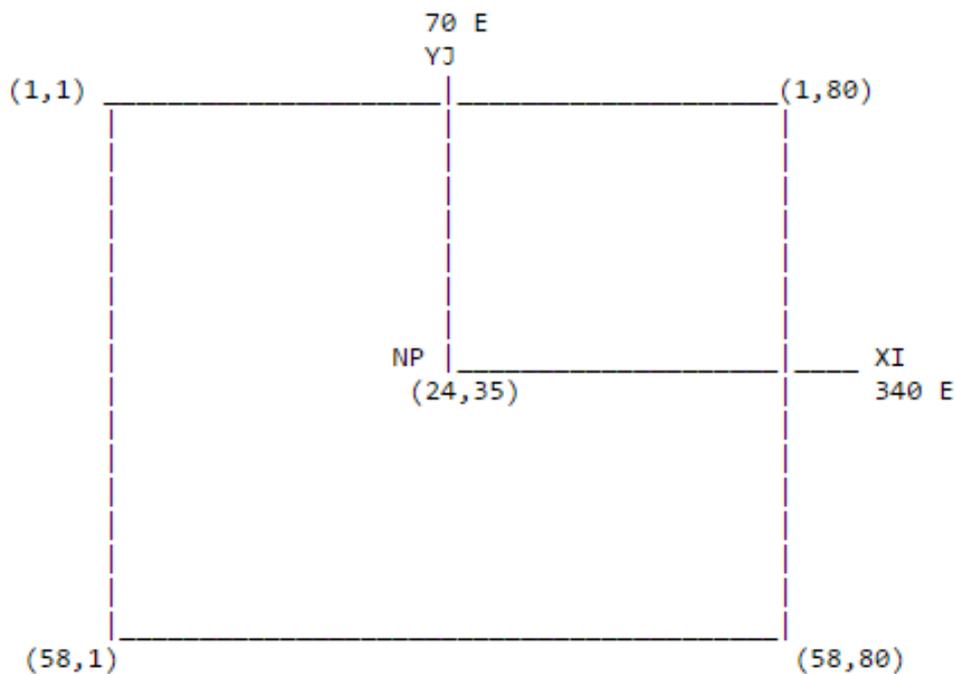
A fájl mindösszesen 1260 mezőt tartalmaz sorokba rendezve az alábbiak szerint:

1)	January	1901
2)	February	1901
.	.	.
.	.	.
.	.	.
.	.	.
1259)	November	2005
1260)	December	2005

A rácscellákra vonatkozó jégkoncentrációjára az alábbi lehetséges karakterek jelennek meg:

'0', '1', ..., '9'	a négyzetes rácsterület tizedben kifejezett jégborítottsága
'*'	tíztized (teljes) jégborítottság
','	a rácscella szárazföldre esik

A havi mezőkhöz tartozó tájékoztató referenciapontokat a 20. ábra mutatja be.



20. ábra: Nevezetes referenciapontok és a koordinátázás rendszere az egyes mezőkön belül

II. fájl: *latlon.dat.txt* – A földrajzi szélességi és hosszúsági koordináták

A fájlban található földrajzi szélességi és hosszúsági koordináták transzformálás után illeszthetők az első fájlban lévő havi rácsokra.

### III. fájl: *areagrid.dat.txt* – Az interpolált adatokat tartalmazó mezők adatforrása

Mindenegyed rácscella egy értéket (1-8) kapott, mely az adatok forrását jelöli. Ha az adott rácscella szárazföld felett fekszik, akkor a forrás értéke -1.

Az alábbi nyolc adatforrást használták az adatbázis összeállításához:

1. Danish Meteorological Institute
2. Japan Meteorological Agency
3. Naval Oceanographic Office (NAVOCEANO)
4. Kelly ice extent grids (based upon Danish Ice Charts)
5. Walsh and Johnson/Navy-NOAA Joint Ice Center
6. Navy-NOAA Joint Ice Center Climatology
7. Temporal extension of Kelly data
8. Nimbus-7 SMMR Arctic Sea Ice Concentrations or  
DMSP SSM/I Sea Ice Concentrations using the NASA Team Algorithm

## 5.2. Számítások és eredmények

A szakdolgozat keretében végzett elemzés szempontjából a releváns időszak az 1978 decembert követő évek, illetve hónapok voltak, így első lépésként a weboldalon (<http://arctic.atmos.uiuc.edu/SEAICE/>) található dokumentációból leválasztottam az erre vonatkozó mezősort. Az új .txt fájl 1979. januártól 2005. decemberéig tartalmazza az információkat. A havi adatokból származtatott színes térképek megalkotásához ezen .txt dokumentumot használtam fel a földrajzi koordináták hozzárendelésével. A térképek elkészítéshez Java (Java EE) programozási nyelvet használtam, NetBeans IDE 8.1 fejlesztő eszköz segítségével. Az adatfájlból soronként beolvastam az adatokat, kijelöltem a forrás pontos helyét (21. ábra). Az eredeti mezősorok 58\*80 db értékével a kapott térképek túlságosan durva felbontásúak lettek, ezért az áttekinthetőbb eredmények érdekében a térképet felnagyítottam úgy, hogy egy karaktert 4 pixelnek feleltettem meg. A cikluson belül egy ideiglenes változóval nyilván tartottam, hogy hányadik sornál jár a beolvasás.

Abban az esetben, ha az ideiglenes változó értéke elérte az 59-et, az azt jelentette, hogy ebben a sorban található, hogy melyik hónapra, illetve évre vonatkozik a következő kép. Ezek alapvetően a képek elnevezésére is szolgálnak. Ilyenkor lenulláztam az ideiglenes változót. Az ideiglenes változót minden egyéb értéknél karakterenként végig iteráltam az egyes sorokon. Ezután az egyes karakterekhez különböző színeket rendeltem hozzá a következő szabályrendszer szerint. A '\*' karakterhez – ami a térképen a teljes jégborítottságot jelzi – fehér (Color.WHITE) színt, a jégmentes vizet jelző karakterhez ('0'-

hoz) a kék (Color.BLUE) színt, a részleges jégborítottság karaktereihez (számok '1'-től '9'-ig) a világosszürke (Color.LIGHT\_GRAY), míg a szárazföldet jelző karakterhez ('.') pedig a barna (Color(0x8B4513)) színt rendeltem (22. ábra).

```

20  * @author Mate
21  */
22  public class JavaApplication6 {
23
24      /**
25       * @param args the command line arguments
26       */
27      public static void main(String[] args) {
28
29          String sCurrentLine;
30          int rowCount = 1;
31          BufferedReader buff = null;
32          try {
33              FileReader fileReader = new FileReader("C:\\Users\\Akos\\Documents\\icecon.1901-2005");
34              buff = new BufferedReader(fileReader);
35              BufferedImage off_Image = new BufferedImage(80 * 4, 58 * 4, BufferedImage.TYPE_INT_ARGB);
36
37              int[] pixels = new int[80 * 58];
38              String title = buff.readLine();
39              while ((sCurrentLine = buff.readLine()) != null) {

```

21. ábra: Adatfájl beolvasása

```

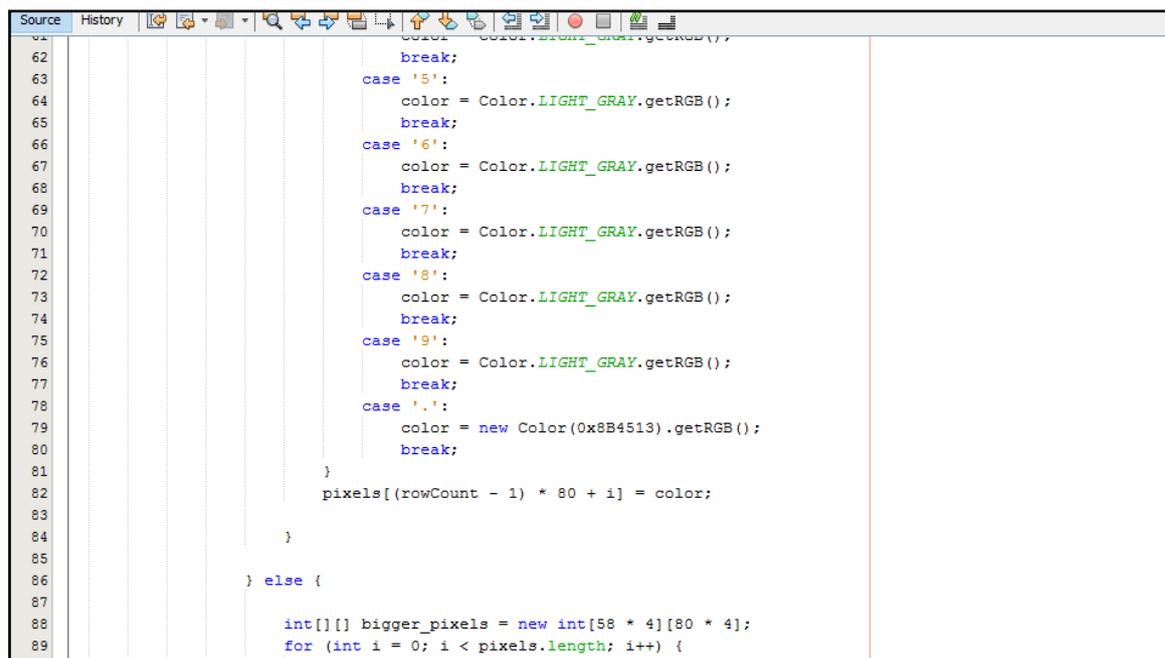
38      String title = buff.readLine();
39      while ((sCurrentLine = buff.readLine()) != null) {
40
41          if (rowCount != 0) {
42              for (int i = 0; i < sCurrentLine.length(); i++) {
43                  int color = 0;
44                  switch (sCurrentLine.charAt(i)) {
45                      case '.':
46                          color = Color.WHITE.getRGB();
47                          break;
48                      case '0':
49                          color = Color.BLUE.getRGB();
50                          break;
51                      case '1':
52                          color = Color.LIGHT_GRAY.getRGB();
53                          break;
54                      case '2':
55                          color = Color.LIGHT_GRAY.getRGB();
56                          break;
57                      case '3':
58                          color = Color.LIGHT_GRAY.getRGB();
59                          break;
60                      case '4':
61                          color = Color.LIGHT_GRAY.getRGB();
62                          break;
63                      case '5':
64                          color = Color.LIGHT_GRAY.getRGB();
65                          break;
66                      case '6':

```

22. ábra: Színek hozzárendelése

Az „1 karakter = 1 pixel” koncepció alapján egy 58\*80 értékből álló, kétdimenziós tömbben tároltam el az egyes pixelek színét tartalmazó információkat (23. ábra). A Java

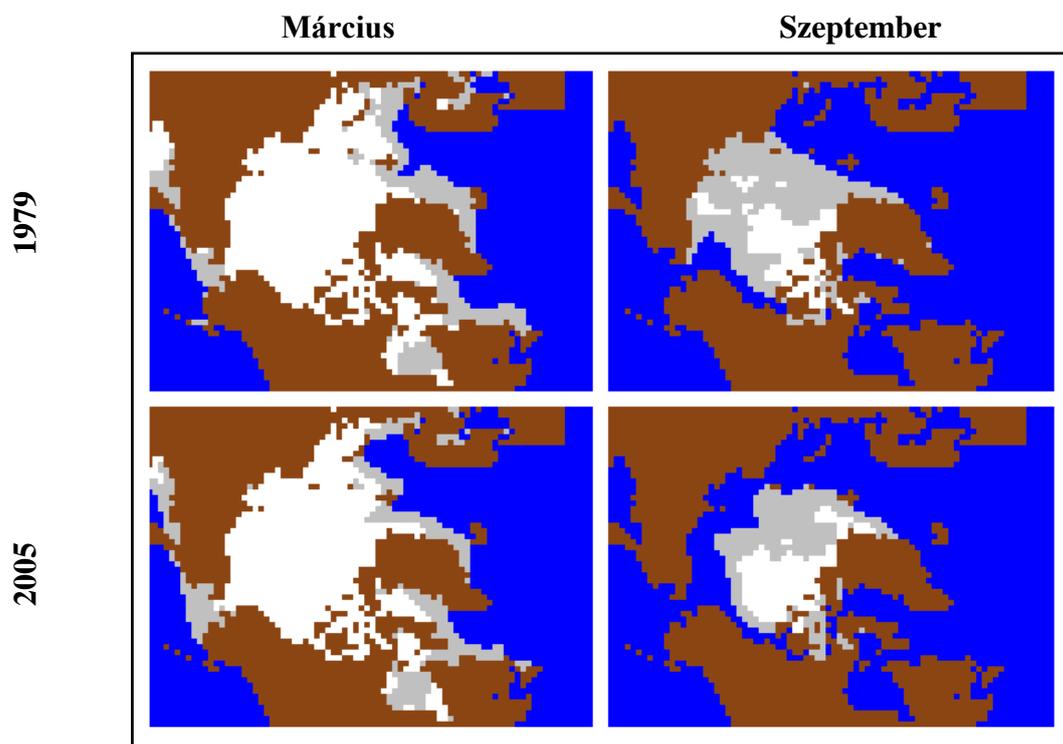
nyelvben ismert java.awt könyvtárat használtam a képek generálásához, így a programból könnyedén előállíthatók. Eredményként 1979 januárjától 2005 decemberéig összesen 324 színes képet kaptam, ami évről-évre és hónapról-hónapra mutatja a tengeri jég változásait az északi pólus térségében. A térképekből egy összesen 27 másodperc időtartamú videóanimációt állítottam össze, ahol 1 másodperc 1 évet, azaz 12 képkockát ölel fel. (Egy adott hónap vagy évszak vizsgálatához az előállított egyedi térképekből szintén elkészítettem a 12, illetve 4 animációt.) Mind az éves, mind az évszakos eredményeket vizsgálva látszik, hogy a legnagyobb változások tavasszal és nyáron tapasztalhatók. (Fontos megjegyezni, hogy egy adott év tele alatt az adott év decemberét és a következő év januárját és februárját értjük, így az éves és az évszakos elemzéseknél csúszás lehet.) A szakirodalomban található felismerésekhez hasonlóan az általam előállított térképsorozatból is kitűnik, hogy a legnagyobb jégborítottsági fluktuációk Grönland partvidékén, a Hudson-öbölben és a Spitzbergákon figyelhetők meg.



```
61         color = Color.LIGHT_GRAY.getRGB();
62         break;
63     case '5':
64         color = Color.LIGHT_GRAY.getRGB();
65         break;
66     case '6':
67         color = Color.LIGHT_GRAY.getRGB();
68         break;
69     case '7':
70         color = Color.LIGHT_GRAY.getRGB();
71         break;
72     case '8':
73         color = Color.LIGHT_GRAY.getRGB();
74         break;
75     case '9':
76         color = Color.LIGHT_GRAY.getRGB();
77         break;
78     case ',':
79         color = new Color(0x8B4513).getRGB();
80         break;
81     }
82     pixels[(rowCount - 1) * 80 + i] = color;
83
84 }
85
86 } else {
87
88     int[][] bigger_pixels = new int[58 * 4][80 * 4];
89     for (int i = 0; i < pixels.length; i++) {
```

23. ábra: Az eredmények kiírása

Az elkészített térkép sorozatból a nyilvánvaló terjedelemi korlátokra tekintettel csupán néhány térképet mutatok be: a műholdas információk felhasználásával összeállított első mezők közül 1979-ből, illetve a letöltött adatbázis utolsó évéből, 2005-ből (24. ábra). A térképek összehasonlításával értékelhetjük a 26 év alatt detektálható jégborítottság csökkenést, ami különösen jól látszik a szeptemberi térképpár esetén.



24. ábra: Tengeri jégfedettség állapota négy kiválasztott hónapban: 1979. márciusban (bal felső térkép), 2005. márciusban (bal alsó térkép), 1979. szeptemberben (jobb felső térkép), 2005. szeptemberben (jobb alsó térkép).

## 6. Összefoglalás

Az globális klímaváltozás problémaköre mindannyiunk számára aktuális téma. Jelentős változások figyelhetők meg a XX. század eleje óta, amelyek az utóbbi évtizedekben felgyorsultak. Az északi pólus kevésbé lakott, nehezen megközelíthető, ezért sokáig a Föld legkevésbé kutatott régiója volt. A műholdas méréseknek köszönhetően sikerült behozni a lemaradást és manapság az egyik leginkább vizsgált szakterület lett a klimatológián belül. Az Északi-sarkkör vidékén a tengeri jég elmúlt évtizedekben detektált visszahúzódása jelzi talán leglátványosabban az egyre nyilvánvalóbb globális klímaváltozást. Az Arktisz a globális átlaghoz képest kétszer gyorsabban melegedik. Ha az eddigiekhez hasonló ütemben folytatódik az üvegházgázok kibocsátása, akkor a vártnál hamarabb, már a XXI. század közepére eltűnhet a tengeri jég az északi póluson, a század végére pedig már teljesen általánossá válhatnak a jégmentes nyarak (IPCC 2013). Az Arktiszon zajló változások az alacsonyabban fekvő földrajzi szélességeken is éreztetik a hatásukat és világszerte szélsőségesebb időjárásra kell számítanunk a jövőben.

A Föld globális átlaghőmérsékletének növekedése a XX. század eleje óta közel  $0,9\text{ °C}$  (IPCC 2013). Klímakutatók szerint ez egy sokkoló érték, aminek elsősorban az antropogén folyamatok eredményeként kialakuló üvegházhatás az oka. A jelenlegi tendenciák szerint nagy eséllyel közelítünk a  $2\text{ °C}$ -os küszöbérték felé, amit az iparosodás előtti átlaghőmérséklethez viszonyítanak. A nemzetközi egyezményekben [16 - UNFCCC] megfogalmazott cél a melegedés lassítása és  $1,5\text{ °C}$  alá való leszorítása. A vezető klímakutató központok által végzett elemzések bizonyítják, hogy korábban is volt globális klímaváltozás, azonban éghajlati léptékben nézve ezek nem ilyen rövid idő alatt (pár évtized), hanem több ezer év alatt zajlottak le (IPCC 2013).

Az éghajlati becslések korlátait és bizonytalanságát is figyelembe véve nagyon nagy valószínűséggel állítható, hogy a krioszféra visszaszorulásának szakdolgozatomban bemutatott trendjei a jövőben is folytatódnak, sőt várhatóan erősödnek (IPCC 2013). Az északi sarkvidéken az ennek hatására kialakuló megváltozó helyi éghajlati és földrajzi viszonyok, a megújuló kereskedelmi és turista hajóútvonalak, a megnyíló Jeges-tenger talpázatának új ásványkincsei a világ politikai elitjének jövőbeli vitáit válthatja ki [17 - ACIA].

## 7. Irodalomjegyzék

- Bamber, J.L., Siegert, M.J., Griggs, J.A., Marshall, S.J., Spada, G., 2013: Paleofluvial Mega-Canyon Beneath the Central Greenland Ice Sheet. *Science*, 341, pp. 997-999.
- Bartholy, J., Pongrácz, R., szerk. 2013: Klímaváltozás. Elektronikus jegyzet. ELTE, Budapest. 186p. <http://elte.prompt.hu/sites/default/files/tananyagok/Klimavaltozas/index.html>
- Bartholy, J., Haszpra, L., Horányi, A., Mika, J., Pongrácz, R., Práger, T., Szentimrey, T., Szépszó, G., 2011: Globális éghajlatváltozás. In: Bartholy, J., Bozó, L., Haszpra, L. (szerk.), Klímaváltozás – 2011. Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszék, Budapest, pp. 11-37.
- Beckley, B.D., Zelensky, N.P., Holmes, S.A., Lemoine, F.G., Ray, R.D., Mitchum, G.T., Desai, S.D., Brown, S.T., 2010: Assessment of the Jason-2 Extension to the TOPEX/Poseidon, Jason-1 Sea-Surface Height Time Series for Global Mean Sea Level Monitoring. *Marine Geodesy*, 33, pp. 447-471.
- Carson, M., Köhl, A., Stammer, D., Slangen, A.B.A., Katsman, C.A., van de Wal, R.S.W., Church, J., White, N., 2016: Coastal sea level changes, observed and projected during the 20th and 21st century. *Climatic Change*, 134, pp. 269–281.
- Drinkwater, M.R., Francis, R., Ratier, G., Wingham, D., 2004: The European Space Agency's Earth Explorer Mission CryoSat: Measuring Variability in the Cryosphere. *Annals of Glaciology*, 39, pp. 313-320.
- Götz, G., 2005: Az éghajlat dinamikájának néhány nyitott kérdéséről. Beszámolókötet, 31. Meteorológiai Tudományos Napok, pp. 10–61.
- IPCC, 1997: The Regional Impacts of Climate Change: An Assessment of Vulnerability. Watson, R.T., Zinyowera, M.C., Moss R.H. (Eds) Summary for Policymakers. Geneva, Switzerland. pp. 7-8.
- IPCC, 2007a: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K., Tignor, M., Miller, H.L. (Eds) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 996p.
- IPCC, 2007b: Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007 M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson (Eds) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 976p.
- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (Eds) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 1535p.
- IPCC, 2014: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C., Girma, B., Kissel, E.S., Levy, S. MacCracken, A.N., Mastrandrea, P.R., White, L.L. (Eds) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132p.
- Kirchmeier-Young, M.C., Zwiers, F.W., Gillett, N.P., 2017: Attribution of Extreme Events in Arctic Sea Ice Extent. *Journal of Climate*. 30, pp. 553-571.
- Lakatos, M., Szentimrey, T., 2011: A klímaváltozással kapcsolatos elemzéseknél az adatminőség kulcsfontosságú! *Légekör*, 56, pp. 116-119.
- Mann, M.E., Rahmstorf, S., Steinman, B.A., Tingley, M., Miller, S.K., 2016: The Likelihood of Recent Record Warmth. *Scientific Reports*, 6, 19831.
- Martin-Español, A., Bamber, J.L., Zammit-Mangion, A., 2017: Constraining the mass balance of East Antarctica. *Geophysical Research Letters*, 44, pp. 1-8.
- Matyasovszky, I., 2012: Néhány statisztikus módszer az elméleti és alkalmazott klimatológiai vizsgálatokban. *Légekör*, 57, pp. 159-161.
- Meier, W.N., 2017: Losing Arctic sea ice: observations of the recent decline and the long- term context. In: Thoman, D.N., Sea Ice (3rd ed.), Hoboken, NJ, USA, pp. 290-303.
- Najafi, M.R., Zwiers, F.W., Gillett, N.P., 2015: Attribution of Arctic temperature change to greenhouse-gas and aerosol influences. *Nature Climate Change*, 5, pp. 246–249.

- NOAA, 2016: Arctic Report Card 2016. American Geophysical Union, San Francisco. 106p.
- Parkinson, C.L., 2014: Global Sea Ice Coverage from Satellite Data: Annual Cycle and 35-Yr Trends. *Journal of Climate*, 27, pp. 9377–9382.
- Péczely, Gy., 1979: Éghajlat. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, pp. 7-10., 214-258.
- Pongrácz, R., Bartholy, J., Bartha E. B., 2013: Analysis of projected changes in the occurrence of heat waves in Hungary. *Advances in Geosciences*, 35, pp. 115–122.
- Pritchard, H.D., Arthern, R.J., Vaughan, D.G., Edwards, L. A., 2009: Extensive dynamic thinning on the margins of the Greenland and Antarctic ice sheets. *Nature*, 471, pp. 971-975.
- Swart, N. C., Fyfe, J.C., Hawkins, E., Kay, J.E., Jahn, A., 2015: Influence of internal variability on Arctic sea-ice trends. *Nature Climate Change*, 5, pp. 86–89.
- Szentimrey T., 2011: Éghajlati adatsorok elemzése, homogenizálása. In: Bartholy, J., Bozó, L., Haszpra, L. (szerk.), Klímaváltozás – 2011. Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszék, Budapest, pp. 38-42.
- Chapman, W.L., Walsh, J.E., 1991: Long-Range Prediction of Regional Sea Ice Anomalies in the Arctic. *Weather and Forecasting*, 6, pp. 271-288.
- WMO 2010: A Meteorológiai Világszervezet állásfoglalása az éghajlat 2010. évi állapotáról (fordította: OMSZ, 2010), 16p.
- WMO 2017: WMO Statement on the State of the Global Climate in 2016. pp. 5-11.
- Zwally, H.J, Li, J., Robbins, J.W., Saba, J.L., Yi, D., Brenner, A.C., 2015: Mass gains of the Antarctic ice sheet exceed losses. *Journal of Glaciology*, 61, pp. 1019-1036.

## Internetes hivatkozások

- [1] – IPCC - <http://www.ipcc.ch/organization/organization.shtml>
- [2] – NSIDC - <http://nsidc.org/about/overview>
- [3] – ICESat, ICESat-2 - <http://icesat.gsfc.nasa.gov/>
- [4] – Operation IceBridge - <http://icebridge.gsfc.nasa.gov/>
- [5] – CryoSat - [http://esamultimedia.esa.int/multimedia/publications/BR199\\_LR.pdf](http://esamultimedia.esa.int/multimedia/publications/BR199_LR.pdf)
- [6] – NASA - Sea ice extent sinks to record lows at both poles. ScienceDaily, 2017.03.22. <https://www.sciencedaily.com/releases/2017/03/170322143149.htm>
- [7] – Trenberth, K. E.: The Climate Data Guide: Nino SST Indices (Nino 1+ 2, 3, 3.4, 4; ONI and TNI). National Center for Atmospheric Research, 2016.02.02. <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/nino-sst-indices-nino-12-3-34-4-oni-and-tni>
- [8] – NSIDC - Arctic sea ice maximum at record low for third straight year. 2017.03.22. <http://nsidc.org/arcticseaicenews/2017/03/arctic-sea-ice-maximum-at-record-low/>
- [9] – NSIDC - Albedo - <https://nsidc.org/cryosphere/seaice/processes/albedo.html>
- [10] – NOAA - Global Climate Report - Annual 2014 <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/2014/13/supplemental/page-4>
- [11] – NOAA - Arctic Report Card: Update for 2016 <http://www.arctic.noaa.gov/Report-Card/Report-Card-2016>
- [12] – NASA - Sea level - <https://climate.nasa.gov/vital-signs/sea-level/>
- [13] – NASA - Land ice - <https://climate.nasa.gov/vital-signs/land-ice/>
- [14] – Lindsey, R.: NOAA's 2016 Arctic Report Card: Visual highlights - 2016.12.13. <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/noaas-2016-arctic-report-card-visual-highlights>
- [15] – NSIDC - Greenland ice sheet today - <http://nsidc.org/greenland-today/>
- [16] – UNFCCC - The Paris Agreement - [http://unfccc.int/paris\\_agreement/items/9485.php](http://unfccc.int/paris_agreement/items/9485.php)
- [17] – ACIA - Arctic Climate Impact Assessment - <http://www.acia.uaf.edu/default.html>

## **8. Köszönetnyilvánítás**

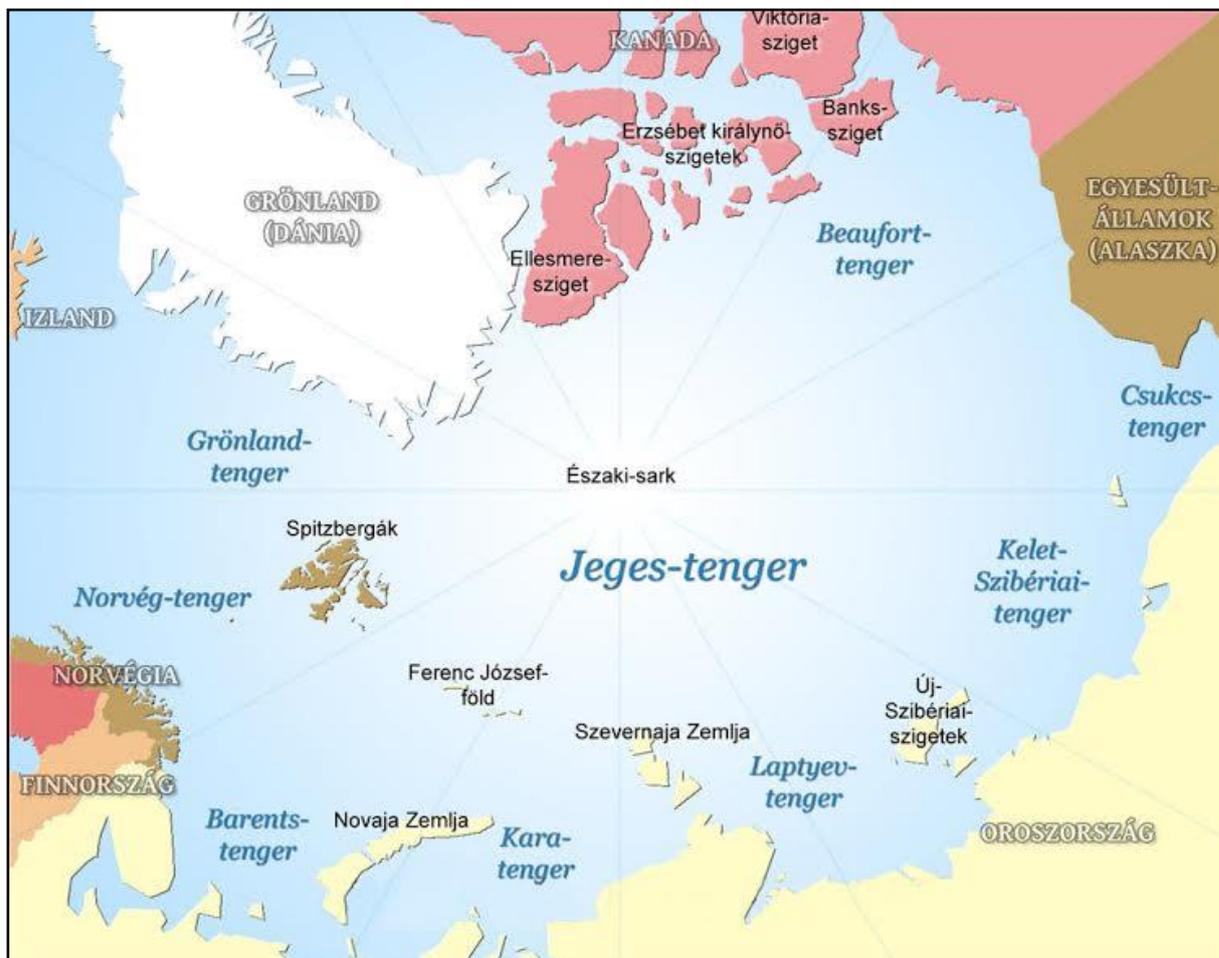
Mindenekelőtt szeretném köszönetemet kifejezni témavezetőmnek, Dr. Pongrácz Ritának, aki lelkiismeretes munkájával, szakmai tudásával, körültekintő útmutatásával és inspiráló ötleteivel hozzájárult szakdolgozatom létrejöttéhez, valamint segített dolgozatom szövegének stilisztikai áttekintésében.

Ezúton szeretném hálámat kifejezni családomnak és rokonaimnak, akik egyetemi éveim alatt támogatták tanulmányaim előrehaladását és szakmai fejlődésemet.

És végül, de nem utolsó sorban köszönöm barátaimnak és szaktársaimnak, hogy ösztönöztek és bátorítottak munkám elkészítésében.

## 9. Függelék

F.1. ábra: Az Északi-sarkvidék részeinek földrajzi elhelyezkedése  
(forrás: [www.terkepek.net](http://www.terkepek.net))





# NYILATKOZAT

**Név:** Herman Ákos

**ELTE Természettudományi Kar, szak:** Földtudományi alapszak – meteorológus szakirány

**Neptun azonosító:** Z542PT

**Szakdolgozat címe:** A krioszféra változásainak elemzése az északi poláris régióban

A **szakdolgozat** szerzőjeként fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem, hogy a dolgozatom önálló munkám eredménye, saját szellemi termékem, abban a hivatkozások és idézések standard szabályait következetesen alkalmaztam, mások által írt részeket a megfelelő idézés nélkül nem használtam fel.

Budapest, 2017. május 19.

---

*a hallgató aláírása*