

14. fejezet

Az éghajlatváltozás hatása a krioszféra egyes elemeire és a permafroszt régióra

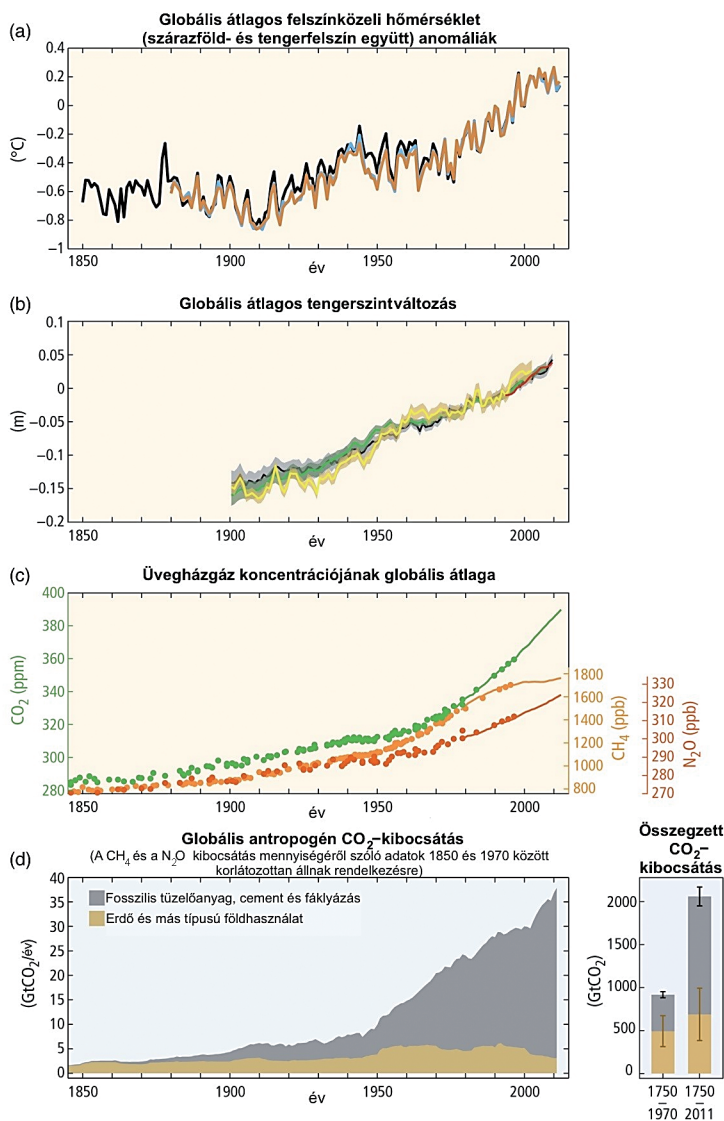
Halász László¹

14.1. Bevezetés

Az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC) 1988-ban Torontóban a Meteorológiai Világszervezet (World Meteorological Organization – WMO) és az ENSZ Környezetvédelmi Programja (United Nations Environment Programme – UNEP) összefogásával alakult meg. Ugyanebben az évben az ENSZ közgyűlése jóváhagyta a szervezet működését. Az IPCC története visszanyúlik az 1979. évi éghajlati világkonferenciára, ahol szorgalmazták egy olyan szervezet létrehozását, amely az üvegházhatású gázok légkörben való tartózkodásának következményeivel foglalkozik, az alkalmazkodás és a megfékezés lehetőségeit kutatja. A szervezet egyik fő célja a világ különböző kutatóhelyein elért tudományos eredmények összegyűjtése, integrált közreadása. Az IPCC mindenki számára átlátható tudományos, technikai, valamint társadalmi és gazdasági információkat nyújt az éghajlat változásával kapcsolatban. Elsősorban az emberi tevékenységek által meghatározott folyamatokra, hatásokra fókuszál. Az összeállított jelentések alapkötetelménye a politikai semlegesség. A tudományos bizonyítékokat, magyarázatokat egybegyűjtő *Első helyzetértékelő jelentés* (First Assessment Report – FAR) 1990-ben jelent meg, és egyértelműen kiemelte az éghajlatváltozással kapcsolatosan a nemzetközi együttműködés szükségességét. Ezért döntő szerepet játszott a létrehozásában az *Egyesült Nemzetek Éghajlatváltozási Keretegyezménye* (United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC), amely a legfontosabb nemzetközi szerződés volt a globális felmelegedés csökkentésére és az éghajlatváltozás következményeivel való megbirkózásra. A második jelentés 1996-ban, a harmadik 2001-ben, a negyedik pedig 2007-ben látott napvilágot. A nemrégiben kiadott ötödik jelentés munkálatait már 2008-ban elkezdtek szervezni, és 2014-ben fejezték be a teljes összegzést. (IPCC 2013) E jelentés felhívta a figyelmet, hogy egyre veszélyesebb környezeti krízis tanúi vagyunk: a változás mértéke, sebessége és várható hatásai súlyosabbak a korábbi felmérésekhez, becslésekhez képest, és gyors, határozott cselekvésre van szükség. A tudományos értékelés alapján minden eddiginél nagyobb bizonyossággal (>95%) volt állítható, hogy a 20. század közepétől megfigyelt melegedés hátterében elsősorban az antropogén hatás áll. 1901 és 2012 között a globális melegedés mértéke elérte a 0,9 °C-ot. A természetes éghajlati

¹ ORCID:0000-0002-8257-4459, halasz.laszlo@uni-nke.hu

változékonyság és a külső kényszerek – így például a Napból érkező sugárzás – változása csak elenyésző ($<0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$) hányadban járultak hozzá a melegedéshez. Különösen figyelemreméltó, hogy mindhárom legutóbbi évtized földfelszíni átlaghőmérséklete meghaladta a megelőző összes évtizedét 1850 óta.



14.1. ábra

A felszínközeli hőmérséklet, az átlagos tengerszintváltozás, a globális üvegház-koncentráció és az antropogén CO_2 változása

Forrás: IPCC 2013

A 14.1. ábrán láthatók az éghajlati rendszer változásaira vonatkozó megfigyelések (sárga háttérű a, b és c panelek) és egyéb indikátorok (kibocsátások: d panel, világoskék háttérrel). Megfigyelések:

- (a) a globális átlagos éves felszínközeli hőmérséklet (szárazföld- és tengerfelszín együtt) eltérései az 1986–2005 közötti időszak átlagától. Az eltérő színek különböző adatbázisokat jelölnek.
- (b) a globális átlagos éves tengerszintváltozás az 1986–2005 közötti időszak átlagos szintjéhez viszonyítva a rendelkezésre álló leghosszabb adatsor alapján. A különböző adatsorokat eltérő színek jelölik. Az adatsorokat úgy igazították, hogy a műholdas magasságmérés (piros) kezdetekor, 1993-ban egyenlők legyenek. Ahol megállapították, ott az adat bizonytalansága a színek árnyékolásával szerepel.
- (c) az üvegházhatású gázok – a szén-dioxid (CO_2 , zöld), a metán (CH_4 , narancs) és a dinitrogén-oxid (N_2O , piros) – légköri koncentrációja a jégfurat-analízisekből nyert adatok (pontok) és közvetlen légköri mérések (vonalak) alapján.

Indikátorok (d): az erdőművelésből és más típusú földhasználatból, valamint fosszilis tüzelőanyagok elégetéséből, cementgyártásból és fáklyázásból származó globális antropogén CO_2 -kibocsátás. Az ezekből a forrásokból származó összegzett CO_2 -kibocsátást és a velük kapcsolatos bizonytalanságokat külön-külön jeleníti meg az ábra a jobb oldali talpas vonal- és oszlopdiaagramokon. A CH_4 és a N_2O -koncentrációk feldúsulását globálisan a (c) panel mutatja.

A megfigyelések és becslések szerint az erősödő üvegházhatás következtében a földi éghajlati rendszerben megjelenő többletenergia 90%-át az óceánok nyelték el, és csak a maradék 10% fordítódott a légkör melegítésére, így az óceáni hőmérséklet számottevően emelkedett. A légkörbe jutó többlet-szén-dioxid jelentős hányadát szintén az óceánok nyelték el, ennek hatására kimutatható az óceánok vizének savasodása. A hóval és jéggel borított területek kiterjedése is jelentősen csökkent; ennek egyik legismertebb következménye az Északi-sarkvidéken az Északnyugati-átjáró évről évre mind hosszabb idejű jégmentessége és hajózhatósága. (PADÁNYI–FÖLDI 2016) A modellek fejlesztésével a tudományos bizonyosság a jövőbeli lehetséges változásokat illetően is lényegesen nőtt. A 2013 szeptemberében közreadott jelentés új éghajlati jövőképeket is bemutatott. E lehetséges jövőképek a módosuló üvegházhatás miatt a felszínre érkező sugárzási többletenergia – az éghajlati rendszert irányító sugárzási kényszer jövőbeni változásának – feltételezett mértékében különböznek. Ennek alakulása pedig nagymértékben az üvegházhatású gázok további globális kibocsátásától és ezáltal légköri mennyiségük alakulásától függ.

A kibocsátás mennyiségi megoszlásának vizsgálata kimutatta, hogy az emisszió döntő részéért az ipar és az infrastruktúra (elsődlegesen a közlekedés) a felelős, de jelentős a lakossági eredetű üvegházgáz-kibocsátás is (főként a fűtésből), és egyes országok esetében a katonai szférához is meghatározó mennyiségek rendelhetők. (PADÁNYI–FÖLDI 2014) A jövőre irányuló scénáriók által szolgáltatott módzatok esetében az egyes szektorok „viselkedésében” beálló változások döntőek, így a klímatudatosság és az üvegházhatású gázok emissziójának csökkentése minden kapcsolódó területen meghatározó fontosságú.

14.2. Az éghajlatváltozás hatásai a krioszférára

14.2.1. Az éghajlatváltozás hatásai a gleccserekre

A világ összes magashegységében, így a Sziklás-hegységben, az Andokban vagy a Himalájában is folyamatosan olvadnak a jégfolyamok. A Himalája keleti felén mindeddig kétezer gleccser tűnt el teljesen. 2002-ben az ENSZ környezetvédelmi programja egy tanulmányt hozott nyilvánosságra, amely szerint a megnövekvő olvadékvíz miatt óriási árvizek pusztíthatnak a közeljövőben ebben a térségben. A Kilimandzsáró, amely 5895 m magasságával Afrika legmagasabb hegye, 12 év alatt a jégsipkájának a harmadát elveszítette. Egyes szakértők szerint 20–30 év múlva teljesen eltűnhet, így a múlté lesz a hósípkás hegy látványa a forró szavanna közepén. (UNEP 2009) Ez nemcsak a hőmérséklet növekedésének, hanem annak is köszönhető, hogy a korábbi esős évszakok, amelyek csapadéka a hegy tetején hó formában hullt le, rendre kimaradnak, illetve a csapadék mennyisége jelentősen lecsökkent. 2001-ben az IPCC szakértői egy tanulmányt adtak ki, miszerint a 21. században 1,4–5,8 °C-kal nőni fog a Föld átlaghőmérséklete. Az, hogy a kisebb szám vagy a nagyobb szám jön be, elsősorban a kibocsátott CO₂ mennyiségétől függ majd. A hegyekben azonban ez a növekedés még nagyobb arányú lehet. Jó példa erre Svájc, ahol a globális világátlagnál háromszor nagyobb arányban emelkedett a hőmérséklet. (IPCC 2013)

Az olvadás oka elsősorban nem a hőszegegyebb telekben keresendő, hanem a minden eddigénél melegebb nyarakban. Ugyanakkor a légköri szennyezőanyagok – így a por – is hozzájárulnak az olvadáshoz. Egy fehér hófelület a napsugárzást szinte teljes mértékben visszaveri, a visszatükrözés értékét albedónak nevezzük. Ez az albedó lecsökken, ha a felület szennyező részecskéket tartalmaz, és a fehér felszín sötétedni kezd, s így a gleccser nagyobb hőmennyiséget is vesz fel. De más tényezők is hozzájárulnak a fokozatos olvadáshoz. Így az ózonréteg vékonyodásával szabad utat kapnak a rövidhullámú és energiában, hőmennyiségben gazdagabb UV-sugarak. Ehhez még hozzájön a közlekedés és a gyárak által termelt szennyezőanyagok hatása, amely a légkör kémiai összetételét és így a csapadékét (például savas esők) megváltoztatja. A kémiai szennyezők mellett az ipari folyamatokban képződő egy mikrométer szemcseméret alatti aeroszol részecskék magasabb atmoszférikus rétegekbe emelkedve igen messzire eljutnak majd, a szennyezés helyétől távol igen lassan ülepednek ki, ezáltal globális szennyeződést hozva létre. (CSURGAI–SOLYMOSI 2015) Ez a hegyekben még drasztikusabb hatású lehet, ugyanis megállapították, hogy az alpesi tavakban sokkal nehezebben, lassabban bomlanak le ezek az anyagok, mint mondjuk egy alföldön fekvő tóban.

A gyors olvadás következtében nagy mennyiségű törmelék rak le a gleccser az úgynevezett végmorénáknál (ez a gleccsernyelvnél lévő törmelék). Ezek a laza kövek egy nagyobb esőzés során megindulhatnak a hegyoldalon, illetve földcsuszamlásokat idézhetnek elő, s ezáltal veszélyeztethetik a völgyben elterülő településeket. De az újonnan képződő gleccsertavak is veszélyt jelentenek a lakosság számára. A permafroszt felolvad. A magashegységekben ugyanis a földfelszín 20–100 méteres vastagságban fagyott állapotban van, ami normális körülmények között egész évben így marad. Az Alpokban ez nagyjából 2800 m-től van így, de az északi oldalakon a tartósan fagyott talaj határa

2200–2300 méterig is lekúszhat, ugyanakkor a déli oldalakon mindez csak 3000 métertől jellemző. A talaj és a szikla itt voltaképpen tartósan fagyott állapotban van. Azonban az elmúlt száz évben a talajfagy határa 150–200 métert felfelé kúszott. Sziklaoldalak, amelyek korábban stabilak voltak, mivel ezeket a jég és a szikla cementként tartotta össze, most instabillá váltak, mivel az összetartó erő, nevezetesen a jég folyamatosan olvad. Tehát egész sziklaoldalak omolhatnak le, és hegyoldalak csúszhatnak a mélybe. Ezzel szintén a környező lakosságot veszélyeztetik, de ugyanúgy ki vannak téve a hegyi turistautak, sőt a sítérep, az épületek (menedékházak stb.), a sífelvonók is ennek a veszélynek. Egyre extrémebb lesz az időjárás, s olyan óriási viharok, mint amilyen a Wiebke volt 1991-ben vagy a Lothar 2002-ben, állandósulnak. A szokatlanul nagy havazások hatalmas nagy lavínakat indítanak el, mint amilyen 1999-ben Galtürben volt (Tirol), ahol 38 ember veszítette életét. Amióta időjárási megfigyeléseket végeznek, nem volt olyan forró a nyár, mint 2003-ban. Heteken át 4000 m felett volt a 0 °C határa, sőt elsőként emelkedett 4800 m fölé a fagyhatár. Azonban nemcsak a nagy meleg volt a baj, hanem az, hogy általában egy nyáron a magashegységekben 50 úgynevezett meleg nyári nappal kell számolni. Az ilyen napok száma 2003 nyarán 100 volt, kvázi megduplázódott, s ezért volt ekkora az olvadás. Ezenkívül a téli hótakaró is, amely a gleccserjeget védi, jóval korábban elolvadt, s mivel a jég jóval sötétebb a hónál, ez jobban magába szívja a nap erejét. Ehhez még hozzájönnek a korábbiakban említett sötét színű szennyezőanyagok, amelyek ezt a hatást még jobban felerősítik. Ráadásul a védő hótakaró korábbi eltűnése, s egyáltalán a hóvastagság folyamatos csökkenése azt is jelenti, hogy a gleccserjégre a korábbinál nagyobb mennyiségű szennyezőanyag rakódik le egyre nagyobb vastagságban, ami ismét katasztrofálisan hathat a meleg nyári időszakban.

Kiterjedt kutatások folynak a gleccserek világszerte tapasztalható csökkenéséről, amely folyamat az elmúlt két évtizedben felgyorsult. (HAEBERLI–HOELZLE 1995; COLLINS 2008; HAEBERLI et al. 2007) Nagyon pontos műholdas mérések alapján a világ gleccserei (beleértve az Északi-sark gleccsereit is) 1961–1990 között $219 \pm 112 \text{ kg/m}^2$ -rel csökkentek évente, 2001–2004 között pedig évente csaknem kétszeres mértékben, évi $510 \pm 101 \text{ kg/m}^2$ -rel. Az alaszakai gleccserek 98%-ának a tömege a visszahúzódás és/vagy elvékonyodás következtében csökken.

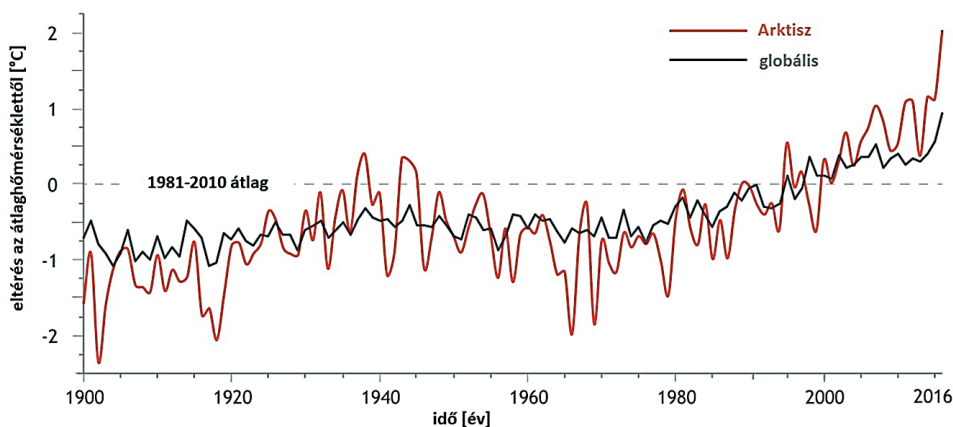
Az előrejelzések szerint a gleccserek és jégsapkák olvadása 2100-ig a tengerek és óceánok szintjét 10–25 cm-rel fogja megemelni. (ARENDE et al. 2002)

Az Északi-sark gleccserei, az alaszakaiaktól eltekintve, az egységnyi területre eső tömeget tekintve nem a legnagyobbak ugyan, de nagy kiterjedésüknek köszönhetően mégis ők lesznek a tengerszint emelkedéséért a leginkább felelősek, mivel a hóval való borítottság időszaka csökken. (IPCC 2007a) A grönlandi és nyugat-antarktiszi gleccserek óceánok felőli végének vizsgálatai azt jelzik, hogy a tengerszint is hatással van a gleccserekre, azok sebességére, vékonyodására és visszahúzódására. (IPCC 2008)

A Kelet-Antarktisiz nagy része mentén szintén megfigyelhető a jégtakaró vékonyodása. A legutóbbi tanulmányok megerősítették a kelet-antarktiszi gleccserek jelentős hatását különösen a Csendes-óceán melegebb nyugati partvidékén, és arra a következtetésre jutottak, hogy a világ egyik legnagyobb jégtakaróját még jobban veszélyeztetheti a levegő és az óceánok melegedése, mint ahogy azt korábban gondolták.

14.2.2. Az éghajlatváltozás hatása a sarkvidékekre

A sarkvidékek nagyon érzékenyek az éghajlatváltozás különféle hatásaira, amelyek tovább növelik ezeknek a régióknak és egyben az egész világnak a fenyegetettségét. A fő szempontok az alábbiak: a Föld felszíni átlaghőmérséklete a 19. század vége óta $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ -kal növekedett, de a sarkvidékeken ez a növekedés még nagyobb mértékű. Az Északi-sarkvidéken elsősorban a téli hőmérséklet az, amely nagyobb mértékben emelkedett, mint a többi régióban, Alaszkában és Kanada nyugati részén a téli átlaghőmérséklet az elmúlt fél évszázadban $3\text{--}4\text{ }^{\circ}\text{C}$ -kal növekedett.



14.2. ábra

Az Arktisz és a Föld átlagos melegedésének összehasonlítása

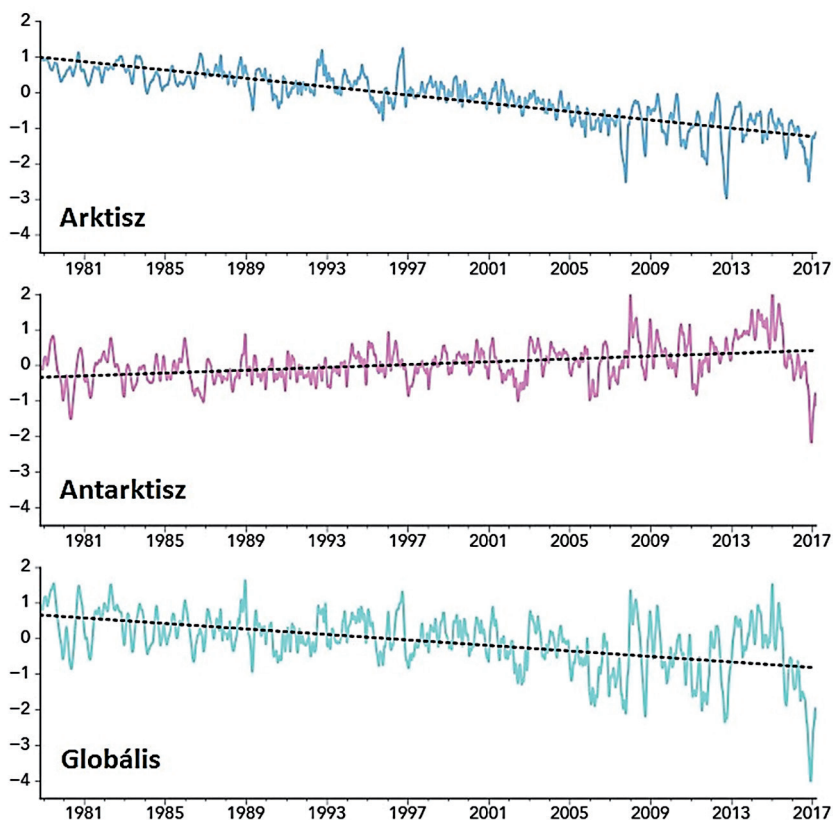
Forrás: HERMAN 2017

Az északi-sarkvidéki talaj feletti levegő hőmérséklete melegebb volt, mint bármikor korábban a 20. század elejének hőmérsékletéhez képest $2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ -kal. A globális átlaghőmérséklet szintén növekedett a 20. század kezdete óta. A sarkvidéki átlaghőmérséklet kb. kétszer gyorsabban nőtt, mint az északi félteke átlaghőmérséklete (14.2. ábra).

A régió elvesztette a tengeri jég kétharmadát az utóbbi harminc évben (lásd 14.3. ábra). A sarki hóval fedett terület nagysága is jelentősen csökkent. Amint a tengeri jég elvékonyodott, nagyobb vízfelület vált szabaddá. Mivel a víz és a jég, illetve a hó albedója különböző, a nyári időszakban a víz nagyobb mennyiségű hőt nyelt el. Ez pedig növeli a víz hőmérsékletét. Ez a visszacsatolás az egyik oka a sarki melegedésnek. A másik ok az, hogy míg a sarki régió melegszik, a hőmérséklete alacsonyabb marad, mint a szubtropikus régióé. Így a sarki régió kevesebb hőt veszít, mint a délebbi régiók.

A növekvő légköri nedvességtartalom hővisszatartó képessége további hőmérséklet-növelő tényező. Az IPCC ötödik jelentése szerint a sarkvidék téli átlaghőmérséklete $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ -kal fog emelkedni 2040-re, az északi félteke átlaghőmérséklete $1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ -kal fog emelkedni. Új extrém magas hőmérsékletek alakulhatnak ki. A nagyobb légköri nedvességtartalom növeli a heves esők és árvizek valószínűségét. A melegedő óceánok

miatt fokozódni fog a gleccserek olvadása és a tengerszint emelkedése. A sarkvidéki melegedés felelős a sarktól távoli anomáláis hideg és hóesés kialakulásáért az USA keleti részén és Európában az elmúlt években. Ez a hatás okozta a 2018 eleji extrém hideg és havas időjárást. A sarki melegedés befolyásolja a légáramlási rendszereket. Télen, amikor kevesebb napsugár éri a sarki felszínt, és a régió lehűl a kisugárzott infravörös hővesztés miatt, a veszteséget az alsóbb szélességekről feláramló levegő és óceáni áram pótolja. A forgó Földön az észak–déli hőmérséklet-különbség ciklonszeleket generál, amelyek nyugatról kelet felé fújnak a közepes szélességeken és a sarkvidék alatti területen. Az óra járásával ellentétes szél az Északi-sarkvidék feletti felső légkörben a sarki örvény. A déli sark fölötti örvény az óra járásával megegyező irányú.



14.3. ábra

A műholdas mérések alapján mért tengeri jég kiterjedésének változásai az 1979–2017 közötti időszakban ($\times 10^6 \text{ km}^2$)

Forrás: HERMAN 2017

Amikor a sarki örvényesség erős, akkor a sarki nyomásgradiens nagy, és északi szelet okoz. Amikor az örvényesség gyengül, a szélirány eltolódik, északi és déli lesz. A hullámzó

áramlások hideg levegőt szállítanak a közepes szélességek és meleg levegőt a sarki zóna felé. Az észak–dél közötti hőmérséklet-különbség változása befolyásolja az áramlásokat, a nyugat–keleti irányú áramlás a forgó Földön instabillá válik, ezek az instabilitások módosítják az észak–déli széláramlásokat. Az Északi-sarkvidéken található mérőállomások adatai alapján például 2006-ban az áprilisi átlaghőmérséklet $+12\text{ }^{\circ}\text{C}$ -kal haladta meg az éghajlati átlagot.

Az utóbbi időszakban extrém meleg hőmérsékletet mértek a tenger felszínén és a levegőben is az Arktiszon. Ez a jég képződését akadályozza, ami tudósok szerint rekordkeves jeget eredményezhet jövőre az Északi-sarkon. A műholdak és sarki meteorológiai állomások adatait figyelő dán és amerikai kutatókat sokkolta és aggodalommal töltötte el, hogy a levegő hőmérséklete megdöbbentő módon 20 fokkal magasabb, mint amennyinek az év ugyanebben a szakaszában lennie kellene. Ne feledjük azt se, hogy a vízhőmérséklet is majdnem $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ -kal magasabb, mint a szokásos októberi–novemberi értékek.

Ezen adatoknál is látványosabb a tengerjég visszahúzódása a nyári időszak végére. A tengerjég minimális kiterjedése a műholdas mérések kezdete óta $8,3$ millió km^2 -ről napjainkra 5 millió km^2 alá csökkent. Legkisebb kiterjedését 2012 különösen meleg nyarán érte el, a tengerjég 2012. szeptember 16-án mindössze $3,41$ millió km^2 -t borított. A tengerjég vastagságából is jelentősen veszített: míg 1980-ban átlagosan $3,6$ méter vastag volt, addig 2008-ban már csak $1,9$ méter. Különösen aggasztó, hogy az éghajlati modellek, amelyek a jövőbeni éghajlatváltozás előrejelzésére szolgálnak, még visszamenőleg sem tudják pontosan leírni a jégtakaró állapotváltozásait. Az éghajlati modellek többsége szerint a jég kiterjedésének a megfigyelthez képest sokkal lassabban kellene csökkennie, a jégtakaró egy részének még ezen évszázad végére is meg kellene maradnia. A műholdas észlelések szerint azonban a nyári jég vesztesen fogy: egyes kutatók szerint már a 2040-es években eltűnhet nyaranta a tengeri jég az Arktisról 1979 óta az arktiszi téli jég kiterjedése körülbelül 3 – 4% -kal csökkent évtizedenként. (RIGNOT 2006) 2007-ben a tengeri jég legkisebb kiterjedése 39% -kal csökkent az 1979–2000 közötti átlaghoz képest, és ez a negatív rekord tovább csökkent 2012-ben.

A globális felmelegedés az északi-sarki tengeri jégtakaró vastagságát is csökkenti, amely így egyre fiatalabb és vékonyabb. Ez azt jelenti, hogy az olvadási szezon kezdetekor a nyílt vízfelületek korábban kialakulnak, és nyáron nagyobb kiterjedésűek. (PRITCHARD et al. 2009)

Az arktiszi jégtakaró olvadásának növekedésével az óceán vize jobban felmelegszik, ami növeli a levegő hőmérsékletét is. Mivel ez a vártnál korábban volt kimutatható, így az Északi-sarkvidék talán már átlépte fordulópontot a jégmentes nyár irányába. (CASEY et al. 2014; SWART et al. 2015) Az előrejelzések azt mutatják, hogy a gyorsulás üteme különösen fontos lehet a következő évtizedekben a jégmentes nyarak kialakulásában. Modellszámításokkal lehet megvizsgálni, hogy az egyes sugárzási kényszerek milyen hatást gyakorolnak az átlagos levegő-hőmérsékletre. Hazai kutatók matematikai modelleken végzett vizsgálatai is fontos eredményekkel szolgáltak egyes, az éghajlatot is befolyásoló veszélyes kémiai szennyezők atmoszferikus terjedésének kérdésében. (CSURGAI et al. 2006)

Az RCP2.6 scenárió esetére kapott modellezési eredmények szerint a felszínközeli léghőmérséklet télen $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ és $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ között fog növekedni a század végére. Az RCP8.5 scenárió esetén a becsült melegedés $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ és $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ közötti a téli időszakban. A tengeri területek felett kisebb lesz a felmelegedés mértéke: a modell eredményei azt jelzik, hogy a téli

középhőmérséklet maximális változásának értéke 2 °C körül fog alakulni. (IPCC 2013) A nyári időszakban is sokkal nagyobb hőmérséklet-emelkedésre számíthatunk a szárazföldi területek esetén. Az RCP8.5 scenáriót tekintő modellszámítások jelzései alapján 5 °C és 7 °C közötti hőmérséklet-növekedés várható, míg az RCP2.6 scenárió esetén maximum 2 °C és 3 °C közötti regionális melegedés valószínűsíthető. A tengerek feletti hőmérséklet-változás ehhez viszonyítva valamelyest kisebb lesz a szimulációs eredmények alapján. Az elmúlt évszázad megfigyelt hőmérsékleti értékeihez képest egyértelműen hőmérséklet-növekedés várható a századfordulóra.

A csapadék mennyiségére vonatkozó becslések a téli és a nyári félévre is növekedést jeleznek a térségben. A két félév közül egyértelműen az áprilistól szeptemberig terjedő időszakban jeleznek nagyobb csapadéknövekedést a modellszimulációk. Az RCP8.5 scenárióra kapott eredmények szerint a szárazföldi régiókban a várható változás mértéke akár 40%-os is lehet a nyári félévben a 21. század végére, míg a tengerek felett alig éri majd el 20%-ot. Az októbertől márciusig terjedő téli félévben a becsült változás mértéke jóval alacsonyabb, 20% körüli a szárazföldön és a tengeren egyaránt. Az RCP2.6 scenárióra mind a két esetben kisebb – mintegy feleakkora – változások valószínűsíthetők, mint az RCP8.5 scenárió esetén.

Az északi-sarki jégsapka minden télen növekszik, amint a Nap néhány hónapra lenyugszik, és minden nyáron csökken, amint a Nap magasabbra emelkedik az északi égbolton. A tengeri jég éves minimális kiterjedését minden évben szeptemberben éri el. 2007-ben rekordalacsony szintet ért el. Idén a közel rekordmértékű olvadást az átlagosnál magasabb nyári hőmérsékletek előzték meg, de azok nélkül a szokatlan időjárási körülmények nélkül, amelyek hozzájárultak a 2007-es rendkívüli olvadáshoz. A hótakaró kiterjedése az elmúlt 30 év alatt mintegy 10%-kal csökkent a tavaszi és a nyári időszakokban. A csökkenés az északi féltekén nagyobb mértékű. A déli féltekén a hosszú távú mérések azt mutatják, hogy az elmúlt 40 évben nem változott, vagy kis mértékben csökkent a hótakaró mérete. A tavaszi olvadás az elmúlt 65 évben egy-két héttel korábbra tolódott, valamint az is bizonyított, hogy a téli olvadás mértéke is növekedett Euráziában és Észak-Amerikában. (IPCC 2013)

Az előrejelzések alapján a 21. század során a hótakaró tovább fog csökkenni annak elenére, hogy egyes magasabban fekvő területeken növekedés várható, ami az ökoszisztémák újrafelosztását eredményezheti. Általánosságban elmondható tehát, hogy a hó megmaradásának időszaka később kezdődik, míg az olvadás korábban, így összességében a jégtakarók nagyon érzékenyek a globális felmelegedésre; a hőmérséklet növekedése fokozza a grönlandi és antarktiszi gleccserek olvadását. Amikor az olvadékvíz eléri a gleccser alatti alapkőzetet, felgyorsítja a gleccser mozgását. Az Antarktiszi-félsziget területén a felmelegedés a jégtakaró összeomlását eredményezte, ami a gleccser folyásának sebességét a tízszeresére növelte, és felgyorsította a jég visszahúzódását is. Az elkövetkezendő évtizedek során, a sarkvidékeken történő változások hatására a jégtakarók nagy hatással lesznek a tengerek szintjének emelkedésére. (ARNELL 2005)

A gyors éghajlatváltozás már érinti, és egyre nagyobb mértékben érinti az Északi-sarkvidéken élő emberi társadalmakat. Az ő tradicionális életmódjuk és kultúrájuk teljes mértékben a sarkvidéki környezettől függ. Mivel a Jeges-tenger egyre nagyobb felülete válik jégmentessé, ez csábítóan hat egyes országokra, hogy kiaknázzák az eddig elérhetetlen földgáz- és kőolajforrásokat. Az energiavállalatok fűrési engedélyekért folyamodnak, a hajózási társaságok pedig izgatottan keresnek újonnan megnyíló útvonalakat az Arktiszon át.

A hetedik kontinens Földünk leghidegebb része, amelynek mintegy 95%-át jég és hó borítja. Ebből következik, hogy a térség albedója rendkívül magas. Mivel a téli időszakban a terület kiesik a Nap sugárzási szögéből, 4–6 hónapon keresztül sötétség uralkodik. Ekkor napfény hiányában csak kisugárzás történik, ami tovább hűti az amúgy is hideg kontinenst. Domborzatára egyaránt jellemzők a hegyvonulatok, síkságok és medencék. Növény- és állatvilága a partvonalai szakaszra koncentrálódott a nagyon alacsony hőmérsékletek miatt. A térséget éghajlatváltozás szempontjából két részre lehet osztani. A melegebb Nyugat-Antarktiszra és a hidegebb Kelet-Antarktiszra. Számos kutatóállomás található a kontinensen, amelyeken többek között meteorológiai méréseket is folytatnak. A legtöbbről 1950 óta vannak adataink, amelyekből fontos következtetéseket lehet levonni a múlt éghajlatára vonatkozóan, és a jövőbeli becslésekhez kiindulási alapot szolgáltatnak. Éghajlata rendkívül hideg, az évi átlagos középhőmérséklet $-49\text{ }^{\circ}\text{C}$, míg az átlagos csapadékmennyiség 150–200 mm évente, ami hó formájában jelenik meg. A szél hófúvásokban teljesedik ki, ami a 400 m-től az 1000 m magasságot is elérheti a légkörben. Az évi átlagos szélsősebesség 2,5–5 m/s közötti értéket vesz fel. (CASEY et al. 2014) Antarktisz-félszigeten (a Vernadsky Station mérései alapján) 1951 óta $2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ -kal növekedett az éves hőmérséklet. A hőmérséklet növekedése láthatóan nagyobb mértékű a sarkvidékeken, mint a Föld más régióiban. Fontos szem előtt tartani azt is, hogy a melegedő óceánok további hőmérséklet-emelkedést okoznak a sarkvidékeken is. A jövőbeli hőmérséklet alakulását külön kell vizsgálni a területen szárazföldi és tengeri részre bontva, mivel a tengereken a különböző légköri áramlatok jelentős hatást fejtenek ki. Az Antarktisz térségére vonatkozó modellfuttatási eredmények között kisebb az eltérés.

Az elmúlt két évtizedben Grönland mellett az Antarktisz veszítette a legnagyobb mennyiséget a jeges vidékeiből. A jég vesztesége 30 Gt-ról 147 Gt-ra növekedett 2002 és 2012 között a térség északi részén az Antarktisz-félszigeten, illetve nyugati területein főként az Amundsen-tengernél, ahol a hőmérsékleti értékek is magasabbak. A globális hőmérséklet-növekedés következtében nagy valószínűséggel tovább fog csökkenni a jégtömeg koncentrációja a 21. század végére. A gleccserek csökkenése főként az 1960-as évek óta jelentős az Antarktiszon, 1990-ig átlagosan 0,76 mm/év ütemű veszteséget detektáltak. Azóta ennek mértéke megnövekedett 0,83 mm/évre. A modellbecslések szerint nagyságuk 5–55% közötti értékben fog csökkenni az RCP2.6 scenárió esetén, míg 35–85% közötti veszteség is felléphet az RCP8.5 scenárió esetén. A jég csökkenésének oka a sztratoszférikus ózonkoncentráció csökkenése, amely az utóbbi néhány évtizedben elsősorban az Antarktisz környékén jelentkezett. (DING et al. 2011) Az ózonréteg elvékonyodásához főként az emberi tevékenység által kibocsátott halogénezett szénhidrogén-vegyületek vezettek. A montreali egyezmény óta ezeknek a fluor- és klórtartalmú vegyületeknek a kibocsátása jelentősen lecsökkent, és az ózonmennyiség stabilizációja is megindult. Mivel a jövőbeni nyári időszakokban a modellek számításai alapján a tengerek nagyobb mértékben jégmentessé válnak, ezáltal albedójuk csökken, s így az infravörös sugárzás abszorpciója meg fog nőni ezeken a területeken.

Már korábban is nyilvánvaló volt, hogy a nyári időszak alatt az Antarktisz jege megolvad, és kialakulhatnak kis tavak vagy folyók a jégpáncélon. Egy új kutatás azonban azt mutatja, hogy az eddig gondoltnál jóval nagyobb mértékű olvadásról van szó: 700 tó, folyó, patak és csatorna jelent meg a kontinensen az elmúlt évtizedek során, és ez komoly aggodalomra ad okot. Ez eléggé aggasztó jelenség, mert már láttak hasonlót korábban is. Akkor

a grönlendi jégpáncél olvadt nagyon gyorsan, 2011 és 2014 között több mint egybillió tonna jég olvadt el. A kutatók arra következtetnek, hogy a kék tavak ennek a folyamatnak a tünetei.

A nyugat-antarktiszi jégtakaró és a kelet-antarktiszi jégtakaró melegeedésében jelentős különbségek figyelhetők meg, amelyeket eddig többnyire kevésbé vettek figyelembe, és amelyek elsősorban az ózonlyuk hűtési hatásának köszönhetők. A nyugat-antarktiszi jégtakarón, amely magában foglalja az Antarktiszi-félszigetet is, jelentős felmelegedés tapasztalható, a félsziget nyugati partjai mentén a hőmérséklet-emelkedés $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (körülbelül tízszerese a globális felmelegedés általános értékének). Az elmúlt 50 esztendőben az Antarktiszi-félsziget nyugati oldalán az óceán felső rétegének a hőmérséklete $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ -kal emelkedett, és a félsziget nyugati oldalán a gleccserek 87%-a visszahúzódott. 2002-ben a Larsen-selfjég teljesen összeomlott. (MEIER et al. 2006)

A nyugat-antarktiszi jégtakaró sokkal instabilabb, mint a kelet-antarktiszi, mivel a tenger szintje alatt ül a sziklaágyán, és a megfigyelések szerint egyre vékonyodik, ami a teljes jégtakaró összeomlásához is vezethet. A nyugat-antarktiszi jégtakaró fogyatkozásának bizonyítékai láthatók az Amundsen-tenger térségében, valamint három gleccseren: a Pine Island-, a Thwaites- és a Smith-gleccseren. Ezen gleccserek jegének olvadása 12 év alatt 30%-kal gyorsult, és a tömegük vesztesége 170%-kal nőtt. Ezeknek a jégpolcoknak az összeomlása előjelezheti a nyugat-antarktiszi jégtakaró teljes összeomlását, amely végül a világtengerek szintjének öt méterrel való emelkedéséhez vezethet, és világszerte felbecsülhetetlen ökológiai, társadalmi és gazdasági következményekkel járna. (PARKINSON-CAVALIERI 2012) A CO_2 légkörbe történő növekvő mértékű kibocsátása, a várható erős szelek és az óceáni víztömeg rétegződésében bekövetkező változások megváltoztatják a Déli-óceán CO_2 -elnyelő képességét is (amely az elmúlt 20 évben 30%-kal csökkent).

Az Antarktisz környéki tengeri jég esetében teljesen más a helyzet, az ugyanis a regionális éghajlati dinamikának köszönhetően változatlan, vagy akár növekszik is. Az antarktiszi tengeri jég maximális kiterjedése 2012. szeptember 26-án $7,51$ milliárd km^2 -es területével rekordot ért el. Ugyanakkor az antarktiszi tengeri jég fennmaradása függ a kontinentális jégtakaró sorsától és a globális felmelegedés szélesebb körű hatásaitól. (GELENCSÉR 2015)

14.3. A sarkvidéki melegedés egyéb következményei

A hőmérséklet növekedésével mindenféle korú jég csökken. 1983 óta az ötévesnél idősebb jégtakaró gyorsabban csökken. Az arktiszi jégtakarónak nagy része most már elsőéves jég, amely a nyári időszakban gyorsabban elolvad. A tengeri jégtakaró korának becslésére kidolgozott újabb módszerek, amelyek a jég vastagságát és térfogatát veszik alapul, indikálják a jég elvékonyodását és a régebbi jegek hiányát is. Az arktikus terület tengereit tápláló folyók vízhozama az elmúlt 30 évben megnövekedett a jég olvadása és a növekvő csapadékmennyiség hatására. Az óceánokba jutó nagyobb mennyiségű édesvíz hatására növekszik az óceánok hőelnyelő képessége, ami viszont a jégtakaró és a gleccserek olvadását fokozza. (HAEERLI-HOELZLE 1995) A termohalin-cirkulációt is befolyásolják ezek a változások, mivel ezek hatására az áramlások mintázata is változhat az óceánokban. (CARSON et al. 2016) A globális felmelegedés hatására a 21. század során minden bizonnyal meg fognak változni a szél- és légnyomási mintázatok, valamint az óceánok áramlási rendszerei. A globális fel-

melegedés két hatása eredményezi a tengerszint emelkedését: a szárazföldi jégtakaró olvadásából származó többletvízmennyiség, valamint a tengervíz felmelegedése okozta hőtágulás. A 2003–2008 közötti időszakban a tengerszint átlagos emelkedése 2,5 mm/év volt, egy kicsit kisebb mértékű, mint az 1993–2003 közötti időszakban (3,1 mm/év). A különböző faktoroknak a tengerszint emelkedéséhez való hozzájárulásában az elmúlt időszakban változások következtek be: a 2003–2008 közötti időszakban a tengerszint-emelkedés 80%-ban a sarki jégtakarók és a magashegyi gleccserek olvadásának volt köszönhető, míg az 1993–2003 közötti időszakban 50%-ban a hőtágulásnak. (MEIER 2017) Az éghajlat változásai a jövőben felgyorsítják a tengerek szintjének emelkedését. Az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület előrejelzései (IPCC 2013) nem tartalmazzák a jégtakaró teljes változásának dinamikáját, így a 2100. esztendőre bekövetkező 18–59 cm-es tengerszint-emelkedés csak óvatos becslésnek tekinthető. Ugyanakkor a grönlandi és a nyugat-antarktiszi jégtakaró csökkenésének előrejelzése és értékelése alapján 0,8–2 m tengerszint-emelkedés is várható 2100-ig.

A légkörből történő szén-dioxid felvétele az óceánok savasságának növekedését is jelenti egy hosszabb, általában egy évtized vagy nagyobb időtartam alatt. (IPCC 2007) Ha nem avatkozunk közbe, és nem dolgozunk összehangoltan a globális felmelegedés hatásai csökkentéséért, nagy gondot jelenthet, hiszen az óceánok savasodása alapvetően befolyásolja a tengeri életközösségeket és fajokat. (HEGH-GULDBERG–BRUNO 2010) Például a világ korallzátonyainak ökoszisztémái életképtelenek lennének, ha a mai légkör CO_2 -szintje teljes hatását fejtené ki rájuk.

Az óceánok savasodása nagy veszélyt jelent a sarkvidéki tengerek táplálékláncára, és hangsúlyosabban hat ezekre a hidegebb óceánokra, mivel a hideg víznek nagyobb a szén-dioxid-elnyelő képessége. Az óceánok savasodása közvetetten a táplálék- és más forrásokon keresztül is hatást fejt ki. Például a madarakra és az emlősökre nem valószínű, hogy az óceánok savasodása közvetlen hatással lenne, de közvetetten hatással lehet ezekre is, ha a táplálékforrásuk csökken, növekszik, földrajzilag megváltozik az elhelyezkedése, vagy egyéb más módon reagál a savasodásra. Az óceánok savasodása megváltoztathatja a tápanyagoknak és esszenciális nyomelemeknek a tengeri élőlények számára a tengervízből való felvehetőségének a mértékét. Egyes külső héjat építő arktikus puhatestűekre is negatív hatással lehet az óceánok savasodása, különösen azok korai életszakaszában. A fiatal és a felnőtt halak valószínűleg meg tudnak birkózni a következő évszázad növekvő savasodásával, de az ikrák és a korai ivadék fázisban lévő halak már érzékenyebbek lehetnek. Általánosságban az élőlények az egyedfejlődésük korai szakaszában érzékenyebbek a savasodás hatására, mint később. A táplálékhálózat olyan fontos fajtái, mint a pteropodák és más meszes héjat építő fajok a sarkvidéki tengerek közvetlenül sebezhető fajtái közé tartoznak, amelyeknek az elvesztése csökkenti a rendelkezésre álló tápanyagok mennyiségét és az óceánok légkörből történő CO_2 -felvételének a képességét.

14.4. Az éghajlatváltozás hatásai a permafrosztra

Az elmúlt 30 évben a permafroszt régió egyes területein 0,5–2 °C közötti melegedés volt megfigyelhető, (ROMANOVSKY et al. 2012) amelyek közül a legérzékenyebbek a Jeges-tengerrel határos területek. 1900 óta az időszakosan fagyott területek legnagyobb kiterjedése 7%-kal csökkent.

Az éghajlatváltozással foglalkozó kormányközi bizottság becslése szerint a permafroszt területe 2050-re 20%-kal csökken, míg az Egyesült Nemzetek Környezetvédelmi Programja szerint a felolvadás mélysége 2080-ra 30–50%-kal növekedhet. Az éves átlagos erózió mértéke a jégben gazdag partokon 2,5–3 m/év, míg a jégben szegény orosz arktikus partok mentén 1 m/év. Az alaszakai Beaufort-tenger partjai mentén az évi átlagos erózió mértéke 0,7–3,2 m/év, de a maximális értéke akár 16,7 m/év is lehet. (IPCC 2007)

A permafroszt és a fagyott talaj degradációja hatással van a vizek felszíni megjelenésére is, mivel a szárazabb talajok esetén, ahol vékony a permafroszt, a tavak visszahúzódása figyelhető meg, míg a vastagabb permafroszt új vizes élőhelyek létrejöttéhez járul hozzá.

Több mint 900 ezer négyzetkilométerre teszik annak a területnek a kiterjedését, ahol olvadásnak indult a permafroszt Nyugat-Szibériában. A felszínen foltokban tőzeglápok jelennek meg, amelyekből metán szivárog a légkörbe. A folyamat önmagát gerjeszti: a felszínre tartó gáztól átjárt talaj ugyanis nem fagy meg. Kelet-Szibériában megfigyeltek olyan „forró pontokat”, gázkitöréseket, ahol még télen sem került fagyott állapotba a föld. Az előrejelzések szerint a permafroszt déli határa ebben az évszázadban több száz kilométerrel fog észak felé tolódni. (ROMANOVSKY et al. 2012)

Az északi-sarkvidéki kontinentális talapzat üledékében nagy mennyiségű metán-hidrát van raktározva, és melegebb hőmérséklet esetén (ami a Föld történetének korábbi időszakában megfigyelhető volt) a metángáz felszabadulhat. (DE CONTO et al. 2012; KORT et al. 2012)

Az Északi-sarkvidék egyes területein a közelmúltban nagymértékű metánkibocsátást figyeltek meg. A permafroszt olvadásával felszabaduló szén-dioxid és a metán a légkörbe kerülve tovább erősíti a globális felmelegedést. A térségben 2014 óta több óriási krátert fedeztek fel. Számos hipotézis létezik a kráterek kialakulásáról, de mindegyik abból eredezteti, hogy a térség hőmérséklete emelkedik. A kráterszerű lyukak megjelenése viszont óriási hatású lehet a szibériai közösség és a környezet számára. Az egyik feltevés szerint a kráterek akkor keletkeznek, amikor a földfelszín alatt csapdába került gázok az olvadás miatt felrobbannak, és ezáltal szén-dioxid és metán, üvegházhatású gázok szabadulnak fel. Általános becslés szerint a globális felmelegedéshez a metán harmincnégyszer nagyobb mértékben járul hozzá, mint a szén-dioxid száz év alatt. De ezek a teóriák figyelmen kívül hagyják azt a tényt, hogy a légköri metán 10–20 év alatt szén-dioxidra és kevésbé jelentős üvegházhatású gázra bomlik.

Az éghajlatváltozással foglalkozó kormányközi munkacsoport szerint 20 év alatt a felmelegedéshez a metán 86-szor nagyobb mértékben járul hozzá, mint a szén-dioxid. Az ugyanakkor kérdéses, hogy a kráterek kialakulása mekkora mennyiségű gázt ereszt a légkörbe, erre nincs megbízható becslés – bizonytalanok a tudósok a kiszabaduló gázok típusának és mennyiségének tekintetében. Szibéria északi területein az emelkedő hőmérséklet miatt is keletkeznek titokzatos kráterek, aminek szörnyű következményei lehetnek – állítják az éghajlatkutatók. Az oroszországi térség fagyott földjének olvadásáa óriási változásokat okoz a tájban, és annak ökológiájában, s az emberéletekre is közvetlen fenyegetést jelent. Legutóbb 130 ezer éve olvadt fel a permafroszt, de akkor ez természetes jelenség volt, amit a Föld pályáján bekövetkezett változás okozott. Ami viszont példa nélküli, az a jelenlegi felmelegedés üteme. 130 ezer éve az olvadás évezredek alatt ment végbe, a mostani viszont évtizedek alatt játszódik le, ezért tapasztaljuk a permafroszt igen gyors összeomlását.

Nyilvánvaló, hogy az olvadó permafroszt jelentős hatással van az éghajlatra. Normál körülmények között a permafrosztok szabályozzák a környezetben található szén mennyiségét oly módon, hogy felveszik és tárolják a nagy mennyiségű szén-dioxidot, amelyet az emberi civilizáció szabadít rá a természetre a fosszilis tüzelőanyagok elégetésével. Szibéria esetében az egyenlet visszájára fordul. A permafrosztból szabadul fel szén, ami gyorsítani fogja a felmelegedés ütemét. Egy öngerősítő, visszacsatoló hurok jön létre, amikor a felmelegedés még több szén kibocsátását okozza, utóbbi pedig újabb lökést ad a felmelegedésnek. A becslések szerint 2050-re a permafroszt területe 20–35%-kal csökken, az aktív réteg mélysége pedig 15–25%-kal, a legészakibb területeken akár 50%-kal is növekedhet. A permafroszt csökkenésével 2100-ra 1 millió km²-rel csökkenhet a fagyott talaj kiterjedése, valamint 900 millió tonna szén kerülhet a légkörbe. (DE CONTO et al. 2012)

Ami viszont biztos, hogy a permafroszt olvadása máris hátrányosan érinti az észak-szibériai lakosok életét. A permafroszt régiók infrastruktúrája a fagyott földre épült, és ahogy a föld felolvad, a vasúti pályák és a közút használhatatlanná válnak, az épületek elsüllyednek. Ez óriási problémát okoz a nagy ipari területeken, nem utolsósorban az olaj- és gázmezőkön. És ha igaz, hogy gázrobbanások hozzák létre a krátereket, akkor az embereket is megölhet.

Ha a talajokban raktározott szén a felmelegedés hatására felszabadul – és egy új, globális kutatás eredményei szerint fel fog –, az az Egyesült Államok kibocsátásának megfelelő mennyiségű szén-dioxiddal súlyosbíthatja a már most is tragikus éghajlatváltozást. Köztudott, hogy a talaj, illetve a termőföld tápértékét főként a lebontott növényi és állati maradványok adják, ami azt is jelenti, hogy a talajnak jelentős a széntartalma. A talajban raktározott szén mennyisége többszöröse annak, mint ami a légkörben szén-dioxid formájában jelen van, és évtizedek óta próbálnak rájönni a kutatók arra, hogy vajon hogyan fog reagálni a földben megkötött szén a felmelegedésre. Több száz vizsgálatot folytattak ezen a területen, de az eredmények meglehetősen ellentmondók voltak. Volt kísérlet, amely a talaj széntartalmának csökkenését – és ezáltal a légköri szén-dioxid koncentrációjának további emelkedését – valószínűsítette, s olyan is akad szép számmal, amely pont ellentétes folyamatokat jövendöl. Ez utóbbiak szerint a felmelegedés hatására nőni fog a növények produktivitása, ami végeredményben a talajok széntartalmának növekedését is okozhatja.

Csak a talajban raktározott szénből 55 milliárd tonna kerülhet a légkörbe a felmelegedés miatt, ami 17%-kal növelheti meg az emberi tevékenység következtében kibocsátott szén-dioxid mennyiségét. Mindez pedig veszélyes visszacsatolást, öngerjesztő folyamatot eredményezhet: a több szén-dioxid miatt még nagyobb lesz a felmelegedés, emiatt még több szén szabadul fel a talajból.

A legnagyobb veszélyben az északon fekvő területek vannak. A fagyott állapotban lévő, úgynevezett permafroszt talajok felső rétegeiben a mikrobák aktivitása minimális, a gombák és a baktériumok nem bontották le a felhalmozott szenet – eddig. A felmelegedés hatására azonban robbanásszerűen gyorsulhat a lebontó szervezetek élettevékenysége, és ez a talaj szén-dioxid-kibocsátásának drasztikus erősödésével jár majd. A korábbi vizsgálatok általában csak a mérsékelt övi területekre terjedtek ki, a mostaniak azonban – kiterjedése és szénraktározó képessége okán indokolt módon – különös hangsúlyt helyeznek az északi sarkkör táján található permafrosztra. Itt várható ugyanis a legerőteljesebb szénfelszabadulás. De a tanulmány szerint nemcsak a jelenleg még állandóan fagyott talajok vannak veszélyben, hanem más olyan talajok is, amelyeknek magas a széntartalma. (MOLNÁR 2017)

Az alacsony széntartalmú talajok ugyanakkor nem bizonyultak érzékenynek a felmelegedéssel szemben. Korábban a hasonló vizsgálatokban általában a talaj szénkibocsátását vagy a növények szénmegkötését vizsgálták, de ezek külön-külön csak a történet felét mesélik el. A végeredmény szempontjából ugyanis a kibocsátás és a megkötés egyensúlya a lényeges.



14.4. kép

Extrém méretű kráter a permafrosztban Batagaika térségében

Forrás: Index 2017

Az eddigi jóslatok alábecsülték a globális felmelegedést. Újraírhatja a számításokat az orosz tudósok új felfedezése: a permafroszt alól szivárgó metán bármikor robbanhat Szibériában. Orosz tudósok nemrégiben hétezer olyan pontot fedeztek fel Szibériában, ahonnan metán tör fel, és ahol bármikor robbanás történhet (14.4. kép). Bemutattak már több olyan helyszínt, ahol a talajból „kiolvadó” metán átalakította környezetét, ilyen például Batagaika térsége, az Észak-Szibériában talált, átlagosan 70 méter mély kráterek, vagy a korábban soha, sehol nem észlelt jelenség, amelynek során a felgyűlt metán olyan ruganyossá destabilizálta a talajt, mintha az egy vízágy lenne.

A metánszivárgás az örök fagy talaja, a permafroszt olvadásának következménye, amely az Eurázsia északi részén évtizedek óta tapasztalható, általános felmelegedéssel függ össze. Szibéria ezen területe egyes becslések szerint több tízezer köbkilométernyi metángázt rejt. A metán a fagyott talajban sokáig stabil állapotban marad, az olvadás miatt azonban – amely a globális felmelegedés eredménye – egyre több gáz halmozódik fel a talaj felső rétegében, ahonnan végül kiszabadul, és a légkör felé veszi az irányt. A felfedezés több okból is aggasztó. Elsősorban azért, mert a metán húsz év alatt 86-szor annyi hőt szabadít fel, mint a szén-dioxid. A legtöbb klímamodell, amely a permafroszt olvadásának hatásait

vizsgálja, csak a felszabaduló szén-dioxiddal számol, a metánnal nem. Így az újonnan előállt helyzet alapján még nagyobb felmelegedésre számíthatunk, mint amekkorát az eddigi jóslatok vetítettek előre. Annál is inkább, mivel úgy tűnik, a tudósok eddig nemcsak az üvegházgázok mennyiségét, hanem az olvadó permafroszt nagyságát is alábecsülték – pedig az „örök jég” már így is rohamtempóban olvad. A sarkvidék kétszer olyan gyorsan melegszik, mint a Föld egésze.

A Readingi Egyetem tudósai nemrégiben azt vizsgálták, hogyan nyeli el a metán a napból érkező meleg sugarakat, ez mennyiben különbözik attól, ahogyan a szén-dioxid viselkedik, és mindez hogyan hat a légkör felmelegedésére. A kutatók arra a következtetésre jutottak, hogy a metán szerepe 25%-kal nagyobb a globális felmelegedésben annál, mint amennyire az ENSZ Éghajlatváltozási Kormányközi Testülete legutóbb becsülte. A kutatás egy másik lényeges információt is eredményezett: a metán – figyelembe véve az összes légköri tényezőt – 30%-kal járul hozzá a globális felmelegedéshez.

A NASA havi jelentése szerint 2017 márciusában Szibériában ismét különösen meleg volt. Világszinten ez volt a második legmelegebb március, amíg a rekorder a 2016-os évi volt. Szibéria és a sarkvidék egyes területein 12,1 °C-kal többet mértek az 1951–1980 közötti átlagnál. A Kelet-Szibériában található Batagaika-kráter az éghajlatváltozás okozta permafroszt olvadás eredményeként évente tíz métert növekszik. Az üreg – amelyet már jelenleg is az egyik legnagyobb földi kráterként tartanak számon – jelenleg körülbelül egy kilométer hosszú és 85 méter mély. A helyiek tartanak tőle, nem mernek a közelébe menni. A területet a helyi jakutok is csak nagy óvatossággal közelítik meg, egyesek „az alvilág átjárójának” hívják. A krátert a permafroszt („örök fagy talaj”, azaz olyan terület, ahol a föld legalább két, egymást követő évben fagyott marad) olvadása hozta létre. (Ecolounge 2017) Az olvadással létrejövő, halmos-üreges talajt termokarsztnak nevezik. A *Quaternary Research* című folyóiratban megjelent tanulmány szerint a kráter az elmúlt 200 ezer év éghajlatváltozásaira nyit rálátást, így lehetőséget ad a klímátörténeti kutatásokra. A tudósok az üledékminták alapján elemzik, hogyan változott a táj a klímával együtt az utolsó jégkorszakban. Ez a kutatás a napjainkban zajló klímafolyamatokba is betekintést nyújthat.

A permafroszt olvadásával Alaszkában is számolni kell. Alaszka az Amerikai Egyesült Államok 49. tagállama, amely a kontinens északnyugati részén helyezkedik el, az ország sarkvidéki részén. A terület évi átlaghőmérséklete jelenleg –3 °C. Az elmúlt ötven év átlagos hőmérséklet-emelkedése 1,9 °C volt. A globális átlaghőmérséklet alakulásához hasonlóan 1940-ig folyamatos emelkedés volt tapasztalható, amelyet egy 30 éves alacsonyabb hőmérsékletű időszak követett. Ezután ismét egy növekedési fázis következett, amely még a mai napig is tart. Érdekes észlelet, hogy az éves csapadékmennyiségek gyakorlatilag a hőmérsékletváltozások járását követték, mintegy azokkal összekapcsolódva, ami nem feltétlenül törvényszerű. A múlt század középső három évtizedében bekövetkezett átmeneti csökkenés után itt is az értékek fokozatos növekedése volt megfigyelhető. (CSOBOLYA 2015, 16)

Modellszámítások eredményei szerint az Amerikai Egyesült Államok területén Alaszkában a legmagasabb a hőmérséklet emelkedése. Az egy éven belüli prediktív értékek szerint ez a növekedés nem egyenletes, nyaranta kisebb mint a téli hónapokban. Ebben a régióban az utóbbi fél évszázad adatai alapján gyakorlatilag kétszer akkora ez a növekmény, mint az országos átlag az USA-ban. Ez pedig azt jelzi előre, hogy az érintett területen a szárazföldi gleccserek és az óceáni jégtakaró együttes, jelentős olvadásával kell számolni, ami meghatározó mértékben járulhat hozzá a tengerek vízszintemelkedéséhez.

Mindezek mellett a terület felszín közeli talajrétegeinek négyötöde a permafroszt régióhoz tartozik. Az eddigi, állandóan fagyott altalaj várhatólag olvadásnak fog indulni, ami többek között a felszíni létesítmények instabilitásához és a talajszint süllyedéséhez vezethet. (IPCC 2013) Reális kockázata van a közeljövőben a talajszerkezet romlása következtében a lakóházak, középületek, közlekedési útvonalak és egyéb felszíni infrastruktúrák sérülésének, hiszen ezek a fagyott talajra lettek tervezve és építve, amikor még nem számoltak az olvadás és következményei jelentette veszélyekkel.

Az elmúlt években a Világ eltérő régióiban (Brazília, Ausztrália, Kalifornia, Dél-Európa) súlyos erdőtüzek pusztítottak elsősorban az éghajlatváltozás következményeképpen kialakult szárazság miatt. Az előrejelzések szerint Alaszka területén is várható lesz a nyári aszályok gyakoriságának és súlyosságának növekedése. Mivel az enyhébb időjárás a területen közel másfélszeresére nyújtotta a tenyészidőszak korábbi megszokott éves időtartamát, ez a növényvilág gyarapodásához vezethetne, ugyanakkor, mivel a hőmérséklet emelkedése intenzívebbé teszi a párolgást is, gyakorlatilag a növényeknek még súlyosabb vízhiányt fog jelenteni. Az erdős területeken emiatt pedig növekedni fog a tüzesetek kockázata is. (CSOBONYAI 2015, 17–19)

A tartósan aszályllyal sújtott területeken hatékony öntözéses rendszerek kialakításával lehet ellensúlyozni a csapadéghiányt, valamint növelni lehet a vízviasszatartást, a vízmegtartó képességet, ezeket az intézkedéseket azonban csak korlátozott lehetőségek mellett lehet alkalmazni. A beruházások jelentősen megnövelik a termelési költségeket rontva a gazdasági hatékonyságot. (BEREK 2016)

A permafroszt talajok felszínére történő építkezés nehéz ugyan, de nem lehetetlen. Tudjuk, hogy a talajban csak a felső 10-15 méteres zóna követi hőmérsékletváltozással a felszín folyamatait. Az ez alatti, úgynevezett „izoterm zónát” már nem érik el a felszíni hatások. Így, ha az épületek alapjait (természetesen a létesítési költségek lényeges drágulása mellett) egészen eddig a mélységig lejuttatják (gerendák, cölöpök stb.), akkor azok stabilitása biztosítható. A 2007-ben elkészült Qinghai–Tibet vasútvonal építése során is nehézséget okozott a permafrosztra történő stabil építkezés megvalósítása. Itt a mérnökök egy másik egyedi technológiát alkalmaztak. Zúzott kővekkel szigetelték a talajt és magas hidakat építettek az érintett területeken, amivel a vágányokat távol tartották a fagyott talajtól, hogy az elhaladó vonatok hőkibocsátása ne erősítse az olvadást. (Ecolounge 2016)

14.5. Következtetések

A krioszféra két alapvető területe, a magashagységekben és a sarkvidékeken megtalálható „örök” hó és jég birodalma gyakorlatilag mindenütt átalakulóban van. A magashegyi gleccserek visszahúzódása, a hó és a jég mennyiségének csökkenése egyes helyeken az innen táplálkozó nagy folyók vízhozamának csökkenésével fenyegetnek. A hóolvadás következtében óriási kiterjedésű hófehér területek színének „sötétedése” csökkenti az albedó értéket (a nap-sugarak visszaverésének képességét), ezáltal tovább erősítve a felmelegedést.

Az éghajlatváltozás eddigi mért adatai és a jövő évtizedekre felállított modellek egybehangzóan azt mutatják, hogy a hőmérsékletek növekedése nem minden területen lesz ugyanakkora. Félretéve az esetleges óceáni áramlatok változásaiból eredő jövőbeni eltéréseket (amelyek persze esetenként igen jelentősek lehetnek majd) általánosságban elmondható,

hogy az Egyenlítő környékén tapasztalhatók és várhatóak a legkisebb eltérések, és onnan a Sarkok irányába haladva mért és jövőbeni melegekedések egyre nagyobb mértékűek. Így ha megnézzük, hogy melyek a jelenleg is az ember által lakott vagy művelt sarkvidéki régiók, akkor észrevehetjük, hogy az északi sarkkör eurázsiai és észak-amerikai területei óriási kiterjedéssel tartoznak ehhez az övezethez. Az éghajlatváltozás átlagát messze meghaladó hőmérsékletemelkedés pedig csak az elsődleges következmény, ebből számos újabb, főként negatív, másodlagos probléma eredeztethető. Mert igaz ugyan, hogy a melegekedés jótékonyan hathat a növény- és állatvilágra, és az ember számára is esetleg lakhatóbbá teszi ezeket a területeket, továbbá az itt található ásványi erőforrás készletek (amelyek igen jelentősek) kitermelése is olcsóbbá és könnyebbé válhat, de...

A sarkvidéki krioszféra degradációja egyre súlyosabb következményekkel jár a világ többi részére is. Nyitott kérdés, hogy az övezetben az esetleg több száz vagy több ezer évig is eltartó teljes hóolvadásnak mikor érkezünk ahhoz a fázisához, ahonnan a folyamat már nem visszafordítható. Ebben az esetben pedig jelentős tengerszint-emelkedéssel és ebből adódóan globális mértékben a tengerparti régiók átalakulásával kell számolni. Veszélybe kerülhetnek a part menti nagyvárosok, kikötők, esetleg kisebb szigetek teljes lakossága.

E mellett a drasztikus melegekedés a permafroszt régióban már ma is erőteljes olvadást okoz, ami a korábban fagyott talajok esetében instabillá teszi a felszínt és felszabadítja az addig jégkristályokba zárt metán gázt. Borúlátó forgatókönyvek szerint a permafroszt metánjának teljes felszabadulása eddig soha nem érzékelt méretű „lökést” adhat felmelegeedésnek és közvetlen globális klímakatasztrófát okozhat.

Az IPCC legfrissebb jelentése egyenesen határidőt szab az emberiség számára: 12 évünk maradt még cselekedni, mielőtt a klímaváltozás visszafordíthatatlanná válik! (McGRATH 2019)

Felhasznált irodalom

- ARNELL, N. W. (2005): Implications of climate change for freshwater inflows to the Arctic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 110, No. D7. DOI: <https://doi.org/10.1029/2004JD005348>
- ARENDT, A. A. – ECHMEYER, K. A. – HARRISON, W. D. – LINGE, C. S. – VALENTINE, V. B. (2002): Rapid Wastage of Alaska Glaciers and Their Contribution to Rising Sea Level. *Science*, Vol. 297, No. 5580. 382–386. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1072497>
- BEREK T. (2016): A vízbiztonsági tervezés szerepe a fenntartható vízgazdálkodásban. *Műszaki Katonai Közlöny*, 26. évf. 2. sz. 32–48.
- 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*, Vol. 134, No. 1. 269–281. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1520-1>
- CASEY, K. A. – FUDGE, T. J. – NEUMANN, T. A. – STEIG, E. J. – CAVITTE, M. G. P. – BLANKENSHIP, D. D. (2014): The 1500m South Pole ice core: recovering a 40 ka environmental record. *Annals of Glaciology*, Vol. 55, No. 68. 137–146. DOI: <https://doi.org/10.3189/2014AoG68A016>
- COLLINS, D. N. (2008): Climatic warming, glacier recession and runoff from Alpine basins after the Little Ice Age maximum. *Annals of Glaciology*, Vol. 48, No. 1. 119–124. DOI: <https://doi.org/10.3189/172756408784700761>

- CSOBOLYA K. (2015): *A várható klímaváltozás elemzése a Föld különböző régióiban*. (Szakdolgozat) Budapest, Eötvös Loránd Tudományegyetem Földrajz- és Földtudományi Intézet Meteorológiai Tanszék.
- CSURGAI, J. – ZELENÁK, J. – LAJOS, T. – GORICSÁN, I. – HALÁSZ, L. – VINCZE, Á. – SOLYMOSI, J. (2006): Numerical simulation of transmission of NBC materials. *Academic and Applied Research in Military Science*, Vol. 5, No. 3. 417–434.
- CSURGAI J. – SOLYMOSI M. (2015): Levegőszűrők hatékonyságának mérése I. rész: Az aeroszol szűrés alapjai, a por- és részecskeszűrők minősítésének rendszere. *Hadmérnök*, 10. évf. 1. sz. 62–78.
- DE CONTO, R. M. – GALEOTTI, S. – PAGANI, M. – TRACY, D. – SCHAEFER, K. – ZHANG, T. – POLLARD, D. BEERLING, D. J. (2012): Past extreme warming events linked to massive carbon release from thawing permafrost. *Nature*, Vol. 484, No. 7392. 87–91. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature10929>
- DING Q. – STEIG, E. J. – BATTISTI, D. S. – KÜTTEL, M. (2011): Winter warming in West Antarctica caused by central tropical Pacific warming. *Nature Geoscience*, Vol. 4, No. 6. 398–403. DOI: <https://doi.org/10.1038/ngeo1129>
- Ecolounge (2016): *Klíma-apokalipszis: Az olvadásnak indult permafrosztból kiáramló metán turbó fokozatra kapcsolja a klímaváltozást!* Elérhető: <http://ecolounge.hu/nagyvilag/klima-apokalipszis-az-olvadasnak-indult-permafrosztbol-avagy-a-fagyott-talajbol-kiaramlo-metan-turbo-fokozatra-kapcsolja-a-klimavaltozast> (A letöltés dátuma: 2018. 02. 03.)
- Ecolounge (2017): *Egyre csak növekszik a hírhedt szibériai óriás-kráter, az „alvilág átjárója”*. Elérhető: <http://ecolounge.hu/nagyvilag/egyre-csak-novekszik-a-hirhedt-sziberiai-orias-krater-az-alvilag-atjaroja> (A letöltés dátuma: 2018. 02. 03.)
- GELENCSÉR A. (2015): A globális éghajlatváltozásról – kicsit másképp. Miért olvadnak a jégsapkák? *Élet és Tudomány*, 70. évf. 9. sz. 262–264.
- HAEBERLI, W. – HOELZLE, M. (1995): Application of inventory data for estimating characteristics of and regional climate change effects on mountain glaciers: a pilot study with the European Alps. *Annals of Glaciology*, Vol. 21. 206–212. DOI: <https://doi.org/10.3189/S0260305500015834>
- HAEBERLI, W. – HOELZLE, M. – PAUL, F. – ZEMP, M. (2007): Integrated monitoring of mountain glaciers as key indicators of global climate change: the European Alps. *Annals of Glaciology*, Vol. 46. 150–160. DOI: <https://doi.org/10.3189/172756407782871512>
- HOEGH-GULDBERG, O. – BRUNO, J. F. (2010): The impact of climate change on the world's marine ecosystems. *Science*, Vol. 328, No. 5985. 1523–1528. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1189930>
- HERMAN Á. (2017): *A krioszféra változásainak elemzése az északi poláris régióban*. Szakdolgozat. Budapest, Eötvös Loránd Földrajz- és Földtudományi Intézet Meteorológiai Tanszék.
- Index (2017): *Csúnya dolgok rejtőznek a szibériai jég alatt*. Elérhető: https://index.hu/tudomany/2017/03/23/csunya_dolgok_rejtoznek_a_sziberiai_jeg_alatt/ (A letöltés dátuma: 2018. 02. 03.)
- IPCC (2007): *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge –New York, Cambridge University Press.
- IPCC (2008): *Climate Change and Water. Technical Paper VI. Observed and projected changes in climate as they relate to water*. Geneva, IPCC Secretariat.
- 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*. Cambridge –New York, Cambridge University Press.

- KORT, E. A. – WOFSY, S. C. – DAUBE, B. C. – DIAO, M. (2012): Atmospheric observations of Arctic Ocean methane emissions up to 82° north. *Nature Geoscience*, Vol. 5. 318–321. DOI: <https://doi.org/10.1038/ngeo1452>
- McGRATH, M. (2019): Climate change: 12 years to save the planet? Make that 18 months. *BBC News*, 2019. július 24. Elérhető: www.bbc.com/news/science-environment-48964736 (A letöltés dátuma: 2020. 02. 17.)
- MEIER, W. N. (2017): Losing Arctic sea ice: observations of the recent decline and the long-term context. In THOMAS, D. N. ed.: *Sea Ice*. 3rd ed. Hoboken, NJ, Wiley and Sons. 290–303. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118778371.ch11>
- MEIER, W. N. – STROEVE J. C. – FETTERER F. (2006): Whither Arctic sea ice? A clear signal of decline regionally, seasonally and extending beyond the satellite record. *Annals of Glaciology*, Vol. 46. 428–434. DOI: <https://doi.org/10.3189/172756407782871170>
- MOLNÁR CS. (2017): Meglódítja a felmelegedést a fagy rabságából szabaduló szén. *Magyar Nemzet Online*, 2017. február 10. Elérhető: <https://magyarnemzet.hu/archivum/tudomany-es-tech-nika/megloditja-a-felmelegedest-a-fagy-rabsagabol-szabadulo-szen-3908180/> (A letöltés dátuma: 2018. 02. 01.)
- PADÁNYI, J. – FÖLDI, L. (2014): Environmental responsibilities of the military (Soldiers have to be “Greener Berets”). *Economics and Management*, No. 2. 48–55.
- PADÁNYI, J. – FÖLDI, L. (2016): Security Research in the Field of Climate Change. In NÁDAI, L. – PADÁNYI, J. eds.: *Critical Infrastructure Protection Research: Results of the First Critical Infrastructure Protection Research Project in Hungary*. Zürich, Springer International Publishing. 79–90. (Topics in Intelligent Engineering and Informatics, 12.) DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-28091-2_7
- PARKINSON, C. L. – CAVALIERI, D. J. (2012): Antarctic sea ice variability and trends, 1979–2010. *The Cryosphere*, Vol. 6. 871–880. DOI: <https://doi.org/10.5194/tc-6-871-2012>
- PRITCHARD, H. D. – ARTHURN, R. J. – VAUGHAN, D. G. – EDWARDS, L. A. (2009): Extensive dynamic thinning on the margins of the Greenland and Antarctic ice sheets. *Nature*, Vol. 471. 971–975. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature08471>
- RIGNOT, E. (2006): Changes in ice dynamics and mass balance of the Antarctic ice sheet. *Philosophical Transactions of The Royal Society A Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 364, No. 1844. 1637–1655. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1793>
- ROMANOVSKY, V. E. – SMITH, S. L. – CHRISTIANSEN, H. H. – SHIKLOMANOV, N. I. – STRELETSKIY, D. A. – DROZDOV, D. S. – OBERMAN, N. G. – KHOLODOV, A. L. – MARCHENKO, S. S. (2012): Permafrost. In *Arctic Report Card: Update for 2012*. 159–169. Elérhető: https://arctic.noaa.gov/Portals/7/ArcticReportCard/Documents/ArcticReportCard_full_report2012.pdf (A letöltés dátuma: 2018. 02. 01.)
- Sarkvidék-kampány, klímaváltozás. (2014) Elérhető: www.poletopolecampaign.org/wp-content/uploads/2014/04/Pole-to-Pole_HUN_climatechange.pdf (A letöltés dátuma: 2018. 01. 30.)
- 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*, Vol. 5. 86–89. DOI: <https://doi.org/10.1038/nclimate2483>
- UNEP (2009): *Climate Change Science Compendium*. Nairobi, United Nations Environmental Program. Elérhető: www.unep.org/pdf/ccScienceCompendium2009/cc_ScienceCompendium2009_full_en.df (A letöltés dátuma: 2018. 01. 31.)