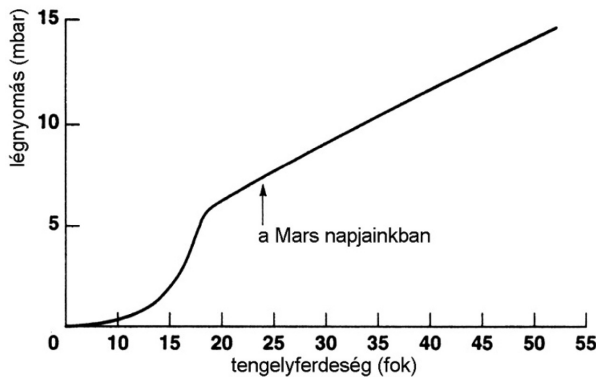


ÉGHAJLATVÁLTOZÁS A MARSON

II. RÉSZ

Az éghajlatváltozás okai a Marson

Napjainkban több jel is megfigyelhető a Marson, amelyek arra utalnak, hogy egykor a jelenlegitől eltérő éghajlati viszonyok uralkodtak a bolygón. A klíma változása elméleti szempontból három skálán jelentkezhet: a bolygó lassú globális hűlése, a ciklikus avagy kvázi-periodikus változások a pályaelemek módosulásaival kapcsolatban, valamint a véletlenszerűen lezajló vulkánkitörések illetve nagyobb becsapódások okozta melegekedések. Az alábbiakban a második csoport lehetséges okait és lezajlását taglaljuk, szem előtt tartva, hogy sok esetben még nincs bizonyíték az egyes modellekre.

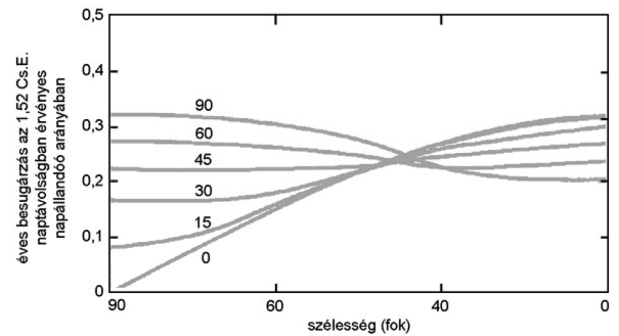


7. ábra. Az átlagos légnyomás és a tengelyferdeség kapcsolata (Fanale et al. 1982, Ward et al. 1979) alapján. Nagy tengelyferdeségnél a pólussapka jelentősége csökken és a regolit széndioxid-abszorpciója növekszik, a pályastíkra közel merőleges forgástengelynél pedig a szén-dioxid jelentős része állandó sapkát formál, drasztikusan csökkentve a légnyomást (görbe baloldali vége).

A Mars pályaelemei élenkebben ingadoznak, mint a Föld hasonló jellemzői. Ennek oka elsősorban, hogy nincs olyan nagytömegű holdja, mint bolygónknak, amely stabilizálná a forgástengely térbeli helyzetét. A tengelyferdeség ezért nagymértékben, a becslések alapján kb. 0 és nagyságrendileg 50 fok között ingadozik. Emellett a közeli Jupiter is erősen zavarja a bolygó mozgását, pályájának alakját folyamatosan módosítja. A mai modellek alapján több periódusú és amplitúdójú ingadozás jelentkezik a pályaelemekben. Ezek közül a legfontosabbak: 5 millió éves időskálán kb. 15 és 45 fok között változik a forgástengely ferdesége, míg az excentricitás (a pálya elnyúltsága) 0,0 és 0,12 között ingadozik.

Az első tényező a beeső napenergia révén az illók (H_2O , CO_2) szélességi eloszlását, migrációját, és az egyszerre a légkörben lévő mennyiségét befolyásolja (7. ábra). A pálya elnyúltsága pedig az évszakok aszimmetriájára van hatással a két félteke vonatkozásában. A

becslések szerint az elmúlt néhány millió évben 35, az elmúlt 10 millió évben pedig 40 foknál nagyobb is lehetett a tengelyferdeség (Touma, Wisdom, 1993, Laskar, 2002). Egyes modellek alapján 40 foknál meredekebb tengelyferdeségnél a mai napállandó esetén nem maradhat fent állandó pólussapka. A váltás a pólussapkáról annak hiányára éles, ugrásszerű lehet. 54 fok feletti tengelyferdeségnél pedig már a pólusok összességében több besugárzást kapnának, mint az egyenlítő (8. ábra) (Ward, 1992).



8. ábra. A besugárzás szélesség szerint változó értéke eltérő tengelyferdeségek esetén

A pályaelemek mellett természetesen egyéb folyamatok is módosítják az éghajlatot. Ilyenek például a nagy becsapódások, amelyek a jéggel teli krioszférából sok H_2O -t juttathatnak átmenetileg a légkörbe. Egy 100 km-es test becsapódása globálisan 10 m vastag forró üledéktakarót borít a felszínre. Ettől sok jég olvad meg, vízgőz kerül a légkörbe és kötött széndioxid szabadul fel. Hasonló jelenség várható a vulkánkitörésektől is, részben juvenilis vulkáni* gázok kibocsátása, részben a felszínre ömlő láva, illetve visszahulló forró vulkáni törmelék olvasztása miatt. A vulkánkitörések mellett, hogy a krioszféra olvasztásával mobilizálhatnak sok illót, aeroszoltermeléssel is befolyásolják a légköri folyamatokat.

A bolygón előforduló legfontosabb üvegházgázok közül a légkör fő összetevője a szén-dioxid. A bolygó életének kezdetén, a vastagabb légkör erősebb üvegházhatást fejtett ki, és sok szén-dioxid felhő is lehetett benne. Mindezek következménye azonban nem ismert eléggé: a több üvegházgáz egyrészt melegíti a légkört, ami felhősíklató hatással bír. Emellett ha elég sok szén-dioxid van a légkörben, az a felső troposzférában globális magasszintű cirruszréteggént kikondenzálódik, és csökkenti a lejutó fény mennyiségét (Kasting, 1991). Utóbbi hatás erősen függ a szén-dioxid felhők szemcseméretétől, így fűtő vagy hűtő hatással is bírhat egy

ilyen felhőtakaró. A kezdeti szén-dioxid felszíni kicsapódását a feltételezett meleg mellett részben a légköri SO_2 is korlátozhatja, amely a marsmeteoritok alapján lehetett az ősi bolygón. A szén-dioxid összetett hatása tehát nincs pontosan tisztázva.

A vízgőz szintén fontos üvegházgáz, amelyről jogosan feltételezzük, hogy alkalmanként nagyobb koncentrációban volt a légkörben, mint ma – de a modellek itt sem adnak biztos előrejelzést. Emellett számolhatunk még ammóniával és metánnal, amelyek fotokémiailag bomlanak. A metán esetében ma is van akkora utánpótlás, ami 10–20 ppb körüli mennyiséget tart fent az atmoszférában.

Az éghajlatváltozások modellezése

Az éghajlatváltozások következményeit nehéz megbecsülni a Marsnál. Ennek fő oka, hogy a változó besugárzás eltérő területekről eltérő mennyiségű illókat mobilizálhat, amelyek aztán különféle helyeken kicsapódva összetett módon befolyásolhatják az albedót, és ezzel a felszíni hőmérsékletet. Ráadásul nagyobb légköri sűrűség mellett változik az áramlás jellege, a sűrűbb légkör azonos sebességű szél mellett is több port kap fel és szállít el – ugyancsak befolyásolva az albedót.

A klímamodellekről általánosan elmondható, hogy egyelőre bizonytalanabbak, mint földi társaik. A szimulációk keretében vizsgált pályaelemek közül legfontosabb a tengelyferdeség módosulása, emellett a pálya nagytengelyének körbefordulását, valamint az excentricitás módosulását is tanulmányozzák.

A besugárzás tehát a fentiek szerint változik a modellekben, mind térben, mind időben. Az így becsült felszíni hőmérsékleti adatok nyomán pedig a felszínről elszublimáló, illetve oda kifagyó víz- és szén-dioxidjég eloszlását közelítik. Utóbbtól erősen függ az albedó, amely a visszacsatolás révén maga is hatással van a felszíni hőmérsékletre. Mindezekkel összefüggésben a por vándorlását is próbálják közelíteni, szintén az albedó becslése szempontjából – utóbbi téren még bizonytalanabbak az eredmények.

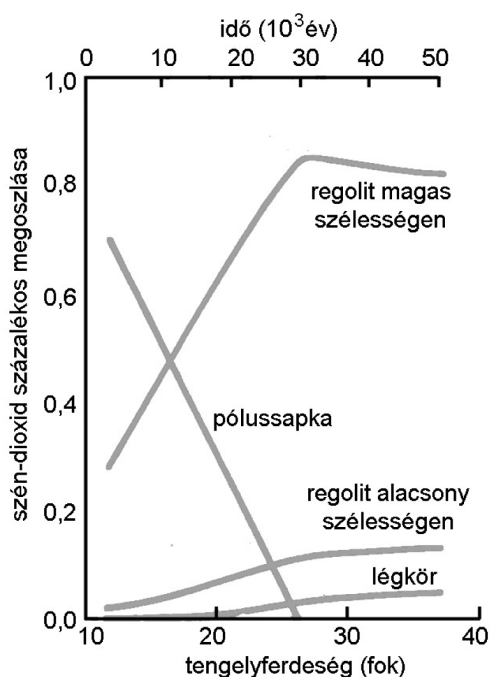
Az illók migrációjának* megbecslésében nem csak a felszínre kiváló, illetve onnan felszabaduló mennyiséget kell figyelembe venni, hanem a regolit* adszorbeáló kapacitását, és pórustérfogatát is. Erre a célra általában 0,2 és 0,4 közötti porozitású bazaltos anyaggal számoltak. Az illóknak a pórustérfogatban történő diffúzióját a pórusok mérete és az átlagos gázsűrűség befolyásolja erősen, amely szintén csak durván becsülhető.

Egy-egy modellbe általában nem integrálják bele az összes fenti említett paramétert, többnyire csak néhányukra végeznek külön-külön becsléseket. A szimulációk így is bonyolultak, mivel az előbb említett hatások nyomán változik a légkörben lévő gáz mennyisége, az egész atmoszféra hőkapacitása, a kicsapódás és fel-

hőképződés jellemzői. A modellekben általában 100 ezer és 10–20 millió év közötti időskálákat vizsgálnak. A bizonytalanságok miatt az alábbiakban csak a több, egymástól független modell által előrejelzett eseményeket mutatjuk be.

Az éghajlatváltozások lezajlása

Általánosan elmondható, hogy a tengelyferdeség növekedésével a sarkvidékről alacsony szélességre vándorolhat a jég, ahol elsősorban a Tharsis* vulkánok nyugati lábainál tartósan meg is maradhat – de a kép még messze nem tiszta, főként, hogy a változó tengelyferdeséggel miként módosul a globális légkörzés és a felhőzet (9. ábra).



9. ábra. A szén-dioxid százalékos megoszlása a légkör és a különböző pufferek között eltérő tengelyferdeségnél. A felső tengelyen a szén-dioxid elhelyezkedésének változásaihoz kapcsolódó időskálák közelítő nagyságrendje látható.

A modellek alapján alapvetően két nagy csoportba sorolhatjuk a marsi klímaállapotokat: jégsapkával bíró, és anélküli állapotokba. A két állapot között viszonylag gyors, éles átmenet lehet: egy kritikus légnyomásnál és hőmérsékletnél a sapka elkezd kiválni (Tokuta et al., 2002), és a folyamat addig zajlik, amíg a légköri gáz és a felszíni szilárd fázis egyensúlyba nem kerül. Ezt légkörösszeomlásnak nevezik, utána viszonylag stabil egyensúlyi állapot jön létre, kiterjedt pólussapkával és ritka légkörral – feltehetőleg ide sorolandó a mai helyzet is.

A lehetséges állapotok között elkülöníthetünk vízjég, valamint vízjég és szén-dioxidjég szerinti sapkákat. A globális hűlés során elsőként a vízjég alkot pólussapkát, majd a további hűléssel ennek tetejére kezd kifagy-

ni a szén-dioxidjég. A jelenlegi állapot is ehhez közeli: északon már csak évszakosan van szén-dioxid fedő a vízjégen, délen azonban (ahol magasabb a sarkvidék, és ettől ott alacsonyabb légnyomás és hőmérséklet uralkodik) még kiterjedt, kb. 2 méter vastag, állandó szén-dioxidjég fedőréteg borítja a vízjeget.

A vízjeget fedő szén-dioxid sapka fennállása idején a légnyomás igen érzékenyen függhet a szén-dioxid sapka albedójától, azaz portartalmától. Utóbbi a hőmérsékletét és ezen keresztül a szublimációs/kicsapódási rátát befolyásolja. A ráakadó por mennyisége pedig szintén érzékenyen függ a légköri folyamatoktól. Napjainkban úgy fest, hogy elsősorban ez a jelenség, tehát a szén-dioxid sapka mennyisége és albedója, pontosabban ennek változása a fő velejárája az éghajlati kilengéseknek.

Egyszerű közelítés alapján kis tengelyferdeségnél állandó pólussapka lehet, alul vízjéggel és rajta szén-dioxidjéggel. Nagyobb tengelyferdeség idején egyre mobilisabb lesz a felső szén-dioxid fedőréteg, és szélsőséges esetben a vízjeget tartalmazó teljes állandó pólussapka is eltűnhet. Ekkor csak a hideg tél idején van egy évszakos képződmény, amely a forró nyár alatt teljesen elenyészik. Mindezekon felül az aszimmetrikus éghajlatok és azok eltolódása, valamint az északi és a déli félteke közötti domborzati különbségek miatt olyan helyzet is lehet, amikor csak az egyik póluson van sapka.

Az éghajlatváltozások nyomai

A különböző időskálájú éghajlati változások nyomainak széles körét látjuk a Marson. Ezek közül feltehetőleg a hosszabb tartamúak jártak erősebb változásokkal, ilyenek leginkább a bolygó lassú, globális hűlésével lehetnek kapcsolatban. Ezek között említhetők az idős, nagyságrendileg 4–3,5 milliárd éves területeken látható, összekapcsolódó hálózatokat alkotó vízfolyásnyomok. Ide sorolhatók még a feltételezett ősi északi óceán eltérő vízmagasságú állapotai nyomán maradt partvonal-jellegű képződmények. Itt említhető továbbá az idős domborzati formák alapján számolt egykori, a mainál nagyobb eróziós ráták, amelyek idején gyorsabban pusztult a felszín.

Valamivel fiatalabb éghajlati állapotok jelei lehetnek azok a tó- és vízfolyásnyomok, amelyek kora többnyire 1 és 3 milliárd év közé tehető. Ezek olyan átmeneti meleg időszakokból maradhettek vissza, amelyek során jelentős mennyiségű H₂O mobilizálódott. A feltételezések szerint itt elsődlegesen belső folyamatokkal (pl. vulkánkitörés, esetleg azzal összefüggő mélységi vízfeltörés) számolhatunk, amelyek erősen beavatkoztak az illók körforgásába, és ezért éghajlati változásokat okoztak.

A fentiekben olyan nyomokat soroltunk fel, ahol feltehetőleg belső okok (vulkanizmus, geotermikus hő, belső eredetű illókibocsátás) is közreműködtek. Dominánsan besugárzásos, azaz „külső” eredetű klímaváltozások, és így a rövidebb időskálájú, kváziperiodikus pályaelem-

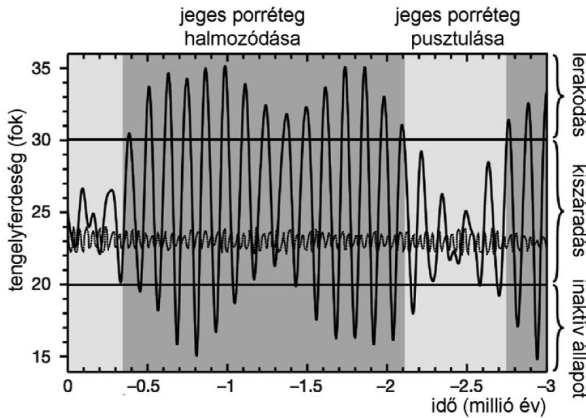
változásokkal kapcsolatos felszínformák az alábbiak lehetnek. Mindkét pólus körül kiterjedt, közel sík felszínű, réteges üledékek jellemzők, vastagságuk sok helyen az egy kilométert is meghaladja. Az üledék finoman rétegzett, az egyes rétegek nagy távolságon követethetők (Milkovich, Head, 2006), képződésük globális jelenségre utal. Vízjégből, porból és fagyott szén-dioxid keverékből állhatnak, és rétegeik a ciklikus éghajlati kilengések egyes időszakaiban képződtek, illetve szárazodtak és pusztultak, létrehozva a sokszínű szerkezetet. Ezek a poláris réteges üledékek, koruk 300 millió évnél kisebb lehet.

Fontos indikátorok lehetnek a dűnemezők is, amelyek a bennük lévő, anyagukat cementáló jég időszakos szublimálása, majd visszafagyása nyomán ciklikusan mozoghattak a szél hatására. Ugyancsak itt említhetők a sárfolyásoknak is nevezett képződmények, amelyek közepes és magas szélességeken lejtőin jellemzők. Egyes elképzelések alapján a maitól eltérő éghajlat idején, maximum néhány millió évvel ezelőtt felhalmozódott jég olvad meg bennük és folyik le alkalmanként a lejtőn – bár más magyarázatok is elképzelhetők. A legfrissebb folyásnyomok mindössze néhány évek lehetnek.

A bolygón dolgozó Spirit és Opportunity roverek olyan mállási kéregeket és vízzel kapcsolatban keletkezett ásványokat találtak néhány szikla felszínén, amelyek könnyen magyarázhatók a mainál nedvesebb egykori viszonyokkal az adott területen. Az ott megjelenő víz vagy a felhalmozódó és megolvadó jég okozhatott a jelenlegitől eltérő kémiai átalakulásokat.

Ugyancsak az éghajlati kilengésekkel lehet kapcsolatban a két féltekén, közepes és magas szélességeken mutatkozó kiterjedt, sima felszínű, de erősen pusztuló és szakadozott megjelenésű réteg. Ezt a méteres vastagságú képződményt feltehetőleg jég cementálta por alkotja, és az elmúlt 1–2 millió évben jött létre. 30 foknál ferdebb forgástengely esetén sok jég szublimál el a pólussapkáról. A besugárzás megváltozott eloszlása, valamint a nagyobb légköri vízgőztartalom miatt a felszíni jég előfordulási határa az egyenlítő felé húzódik. Eközben az erősödő szelek a modellek alapján növelik a jéggel lerakódó por mennyiségét, és a kettő eredőjeként változó portartalmú, jéggel cementált üledéktakaró (fedőüledék) képződik. A modellek alapján 30–50 ezer év alatt akár több méter vastag ilyen takaró keletkezhet. Amint a forgástengely ferdesége csökken, a jég stabilitási határa a pólusok felé húzódik. Ebben az időszakban a 30–60 fokos szélességi zónában a fentiek szerint képződött üledék pusztul. Ennek ütemét lassítja a fogyó takaró tetején visszamaradt por, hatékonyan csökkentve az alatta lévő jég szublimációját. A fedőüledék képződésének és pusztulásának feltételezett időszakai a 10. ábrán láthatók.

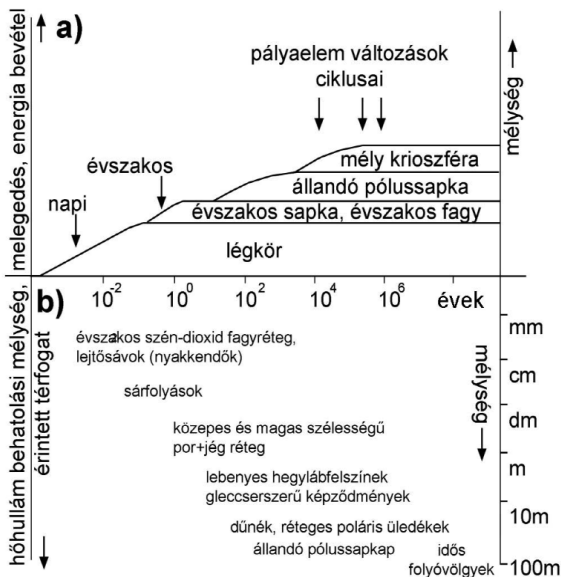
A legfrissebb éghajlati változások nyomai között említhetők a déli pólussapka vízjég rétegét borító fagyott szén-dioxid fedő évről évre megfigyelt zsugorodása (5. ábra). Ez



10. ábra. A diagramon a tengelyferdeség modellezett változása látható az elmúlt 3 millió évben. A függőleges tengelyen balra az eltérő tengely-ferdeség-értékek láthatók, jobbra ennek megfelelően három időszak van lehatárolva, a szövegben említett közepes szélességen található fedőüledékek szempontjából. 20 foknál kisebb tengelyferdeség esetén nincs jelentős változás a területen (inaktív állapot). 20 és 30 fok közötti tengelyferdeségnél a kérdéses fedőüledék jégtartalma szublimál, azaz kiszárad, konzisztenciája gyengül (szárazodás). 30 foknál nagyobb tengelyferdeség esetén pedig a fedőüledék területén por és jég rakódik le, tehát a réteg halmozódik (lerakódás) (Head et al. 2003).

a bolygón zajló globális felmelegedés nyomaként híresült el, noha nem feltétlen jelenti a globális átlaghőmérséklet emelkedését. Az űrszondás képek elemzése alapján az elmúlt 21 évben úgy változott a poreloszlás a Marson, hogy összességében kissé sötétedett a bolygó, amely kb. 0,6 fokkal növelte az átlaghőmérsékletet.

A cikkben áttekintett témakörök mutatják, hogy a Mars, pályaelemeinek labilis helyzetével, a H₂O és CO₂



11. ábra. A néhány feltételezett kapcsolat a klimatikus planetomorfológia témakörében. a): különböző nagyságú (függőleges tengely) és periodicitású (vízszintes tengely) jelentkező energiabevétel (besugárzás) által érintett illószférák (középen). b): az ezeknek megfelelő változásokkal létrejött felszíninformák (középen), illetve az érintett mélységi tartományok (függőlegesen).

halmazállapota szempontjából kritikus hőmérséklet- és nyomásviszonyaival tökéletes laboratórium az éghajlat változásának, és az ezzel kapcsolatos felszíni módosulásoknak tanulmányozására (11. ábra). A változások léptéke, a használt időskálák nagysága jelentősen eltér a Földön megszokottól, így első gondolatra kevés a kapcsolódási pont a két égitest között. Azonban a földi szempontból szokatlan megközelítések hozzájárulhatnak a bolygónkon geológiai időskálán jelentkező drasztikus éghajlati változások modellezéséhez.

Köszönetnyilvánítás: A szerző köszönetét fejezi ki Birszki Bálint lektornak építő javaslataiért, és Dr. Bartholy Juditnak az ELTE Meteorológiai Tanszéke vezetőjének tanácsaiért.

Kereszturi Ákos
geológus

Hivatkozások

Fanale, F. P., Salvail, J. R., Banerdt, W. B., Saunders R. S. 1982: The regolith-atmosphere-cap system and climate change, *Icarus* 50, 381-407.
 Head, J. W., Mustard, J. F., Kreslavsky, M. A., Milliken, R. E., Marchant, D. R. 2003: Recent ice ages on Mars, *Nature* 426, 797-802.
 Kasting, J. F. 1991: CO₂ condensation and the climate of early Mars, *Icarus* 94, 1-13.
 Laskar, J., Levrard, B., Mustard, J.F. 2002: Orbital forcing of the Martian polar layered deposits, *Nature* 419, 375-377
 Milkovich, S.M., Head, J.W. 2006: Surface textures of Mars' north polar layered deposits: A framework for interpretation and future exploration. *Science*, doi: 10.1555/mars.2006.0003.
 Tokuta, Y., Masatsugu, O., Kiyoshi K., 2002: Role of H₂O and CO₂ ices in Martian Climate Changes, *Icarus* 159, 439-448.
 Touma, J., Wisdom, J. 1993: The chaotic obliquity of Mars. *Science* 259, 1294-1297.
 Ward, W.R., 1979: Present obliquity oscillations of Mars: Fourth-order accuracy in orbital E and I. *Journal of Geophysical Research*, 84, 237-241.
 Ward, W. R. 1992: Long-term orbital and spin dynamics of Mars. In Mars (Eds. H. H. Kieffer, B. M. Jakosky, C. W. Snyder, and M. S. Matthews) University of Arizona Press, Tucson, 298-320.

A Meteorológiai Világszervezet állásfoglalása az éghajlat 2006. évi állapotáról

A WMO 1993 óta bocsát ki éves állásfoglalásokat a globális éghajlat állapotáról. A 2006. évről szóló ismertetés szerint a globális felszíni hőmérséklet tavaly közel fél fokkal az 1961–1990-es átlag fölött alakult. Ezúttal is az északi félteke volt a globális átlagnál jóval melegebb (+0,59 °C), mint a déli félgömb (+0,26 °C). A XX. század kezdete óta a globális átlaghőmérséklet mintegy 0,7 °C-ot emelkedett.

A kontinensek összesített csapadékhozama magasban meghaladta a 30 éves átlagot, annak ellenére, hogy sok területet aszály sújtott.