

FÜSTRÉTEG A SZTRATOSZFÉRÁBAN BRIT KOLUMBIÁBÓL

SMOKE LAYER IN THE STRATOSPHERE FROM BRITISH COLUMBIA

Kolláth Kornél¹, Szini Hajnalka¹, Tóth Zoltán^{1,2}

¹Országos Meteorológiai Szolgálat, 1525 Budapest Pf. 38., kollath.k@met.hu, szini.h@met.hu

²Stratolab Kutató, Fejlesztő és Innovációs Kft., zoltan.toth@stratolab.hu

Összefoglalás. 2017 augusztusában kanadai erdőtüzek felett kialakuló zivatarfelhők (pyrocumulonimbus, röviden pyroCb felhők) egy csoportja által hatalmas mennyiségű füst jutott fel a sztratoszférába. A füst nyolc nap alatt hazánk fölé került. A fotókon és a műholdképeken kívül a budapesti felhőalaplémérő adatainak, illetve napspektrofotometriás mérések tükrében mutatjuk be az eseményt.

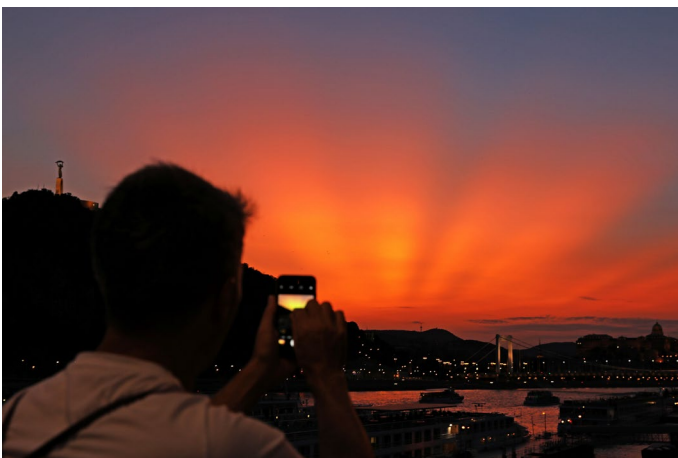
Abstract. Cluster of pyrocumulonimbus (or shortly pyroCb) clouds associated with wildfires in Canada injected an exceptionally high amount of smoke into the stratosphere in August 2017. The smoke transported over Hungary in eight days. Beyond photos and satellite images, interpretation of ceilometer and spectrophotometer measurement data will be shown.

Bevezető. Augusztus 22-én este hazánkban nem mindennapi égi látványosság ragadta meg a bémészködők figyelmét (Veres, 2017). A naplementét követően szokatlanul határozott megjelenésű és hosszúra nyúlt alkonyati sugarak formáltak legyezőszerű alakzatot az északnyugati égbolton (1. ábra). Az eget gyakran kémlelő tájékozottabb észlelők már sejtették a jelenség okát. A megelőző hetekben, napokban komoly erdőtüzekről érkeztek hírek Kanadából. A magassági áramlások által szállított füst pedig már az augusztus 20-i műholdképeken szembetűnő volt Európa felett. A fölöttünk tartózkodó fátyolszerű füst réteg hatása, megfigyelése, mérési adatokban történő megjelenése számos szempontból érdekesnek, tanulságosnak bizonyult (2. ábra).

Vegetáció tüzek – Miért volt kitüntetett a 2017-es kanadai eset? Az erdőtűz, vegetációtűz a bioszféra – részben az emberi tevékenységtől független – természetes folyamatai közé tartozik. Bár a legnagyobb biomassza tömeg az alacsonyabb szélességeken válik a tűz martalékává, a mediterrán területen és a magas szélességek tajga erdőiben is jelentős a vegetációtűzek gyakorisága (Bowman et al., 2009). Az előfordulást, a tüzek intenzitását, kiterjedését nagyban befolyásolja az adott időszak időjárása. A 2017-es év globálisan a második legmele-

gebb év volt a 2016-es rekord után. Júliusban Dél-Európában, főként Portugáliában, az Adrián, Olaszországban a száraz, szeles időjárás következtében rendkívüli erdőtüzek pusztítottak. Az USA-ban az erdőtüzek elleni küzdelem éves költsége 2017-ben minden korábbinál magasabbnak adódott. Kaliforniában és a kanadai Brit Kolumbiában rekordot döntött a leégett terület nagysága. Érdekes, hogy Grönlandon, annak nyugati partjainál is észlelhető volt vegetációtűz, amire korábban csak pár jelentéktelen példa adódott (Evangelidou, 2018). Kanada nyugati részén korán beköszöntött a tavasz, amit hosszú, száraz nyári periódus követett (az augusztusi 850 hPa-os hőmérsékleti anomáliát lásd a 3. ábrán). Az erdőtüzek július elején kezdődtek. A szezon csúcspontjának augusztus 18-a tekinthető, amikor 432 ezer km² összefüggő terület volt érintett. Összesen az év során egymillió hektár égett le és 45 ezer ember kényszerült otthonának legáltalább átmeneti elhagyására Brit Kolumbiában.

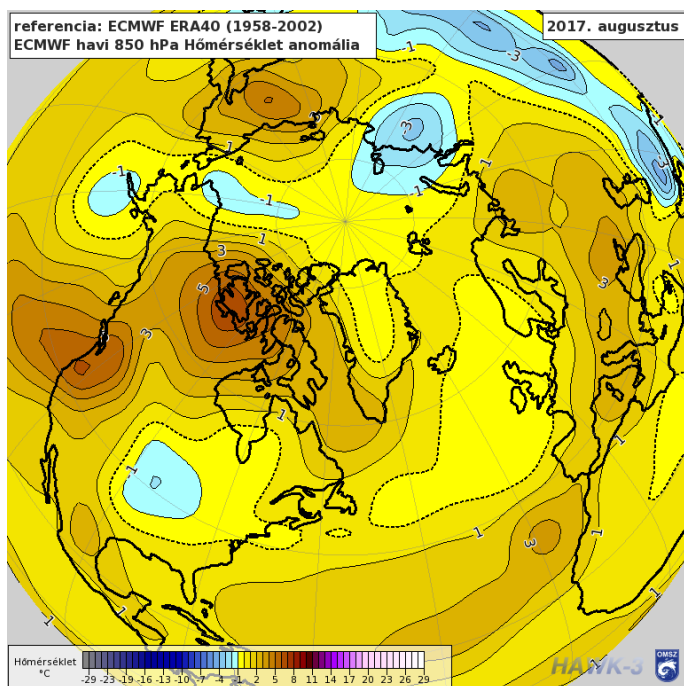
Mi köze a fenyőhánccsúnak a pyroCb-hez? A száraz, meleg időjárás következtében kiszáradt aljnövényzet mellett a kártevők miatt megbetegedő, elhaló fák is adott esetben ideális, gyúlékony „üzemanyagát” jelenthetik az erdőtüzeknek. Észak-Amerikában és ezen belül Brit Kolumbiában is jelentős az egyik szűfélé, a nagy fenyő-



1. ábra: Alkonyati sugarak augusztus 22-én. A horizont alá nyugvó Nap sugarai nyomán nagy távolságban lévő hegyek, felhők árnyéka vetül fel a 14–15 km-es magasságban tartózkodó füst rétegre.
Készítette: Veres Viktor (Veres, 2017)



2. ábra: Krepuszkuláris sugarak a tarcali Szent Teréz kápolnával 2017. augusztus 26-án. Készítette: Varga István



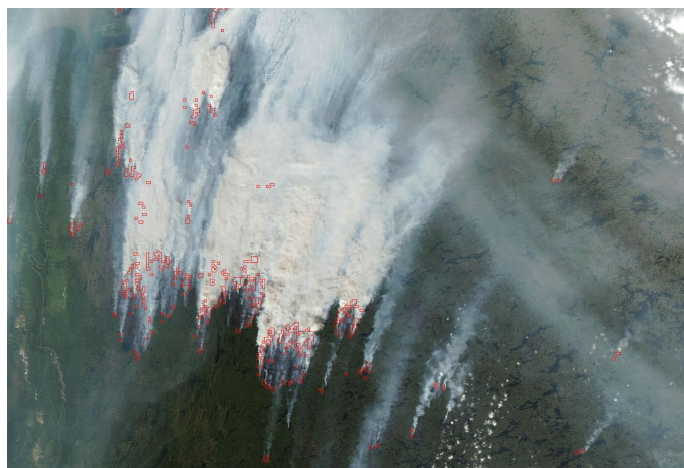
3. ábra: Hőmérsékleti anomália 850 hPa-on, 2017. augusztus

háncsszű kártétele. A logikus feltételezés szerint e kárté-
vő elszaporodása és a tüzesetek gyakorisága között
egyesen lehet az összefüggés. Ugyanakkor a megritkuló,
lecsupaszodott fenyőfák a tűz terjedését és intenzitását
egyben gátolják is. A témában elérhető irodalomban el-
lentmondásos következtetéseket találunk. Valószínű,
hogy a hevesebb koronatüzek kockázata abban az átme-
neti periódusban a legmagasabb, amikor a kiszáradt tüle-
velek még nem hullottak le az ágakról (Hicke et al.,
2012; Hart et al., 2016).

Nagyobb erdőtüzek fölött – a felszabaduló hő és nedves-
ségtartalom hatására – alkalmanként zivatarfelhők is ki-
alakulnak, melyeket pyro-cumulonimbusnak, röviden
pyroCb-nek nevez az irodalom (Fromm et al., 2010), de a
WMO felhőatlaszában a flammagenitus elnevezés jelzi a
kialakulás módját. A jelenség nagyban hasonlít a vulkán-
kitörések fölötti felhőképződéshez. A föláramlás ebben
az esetben is koncentráltan és igen nagy mennyiségben

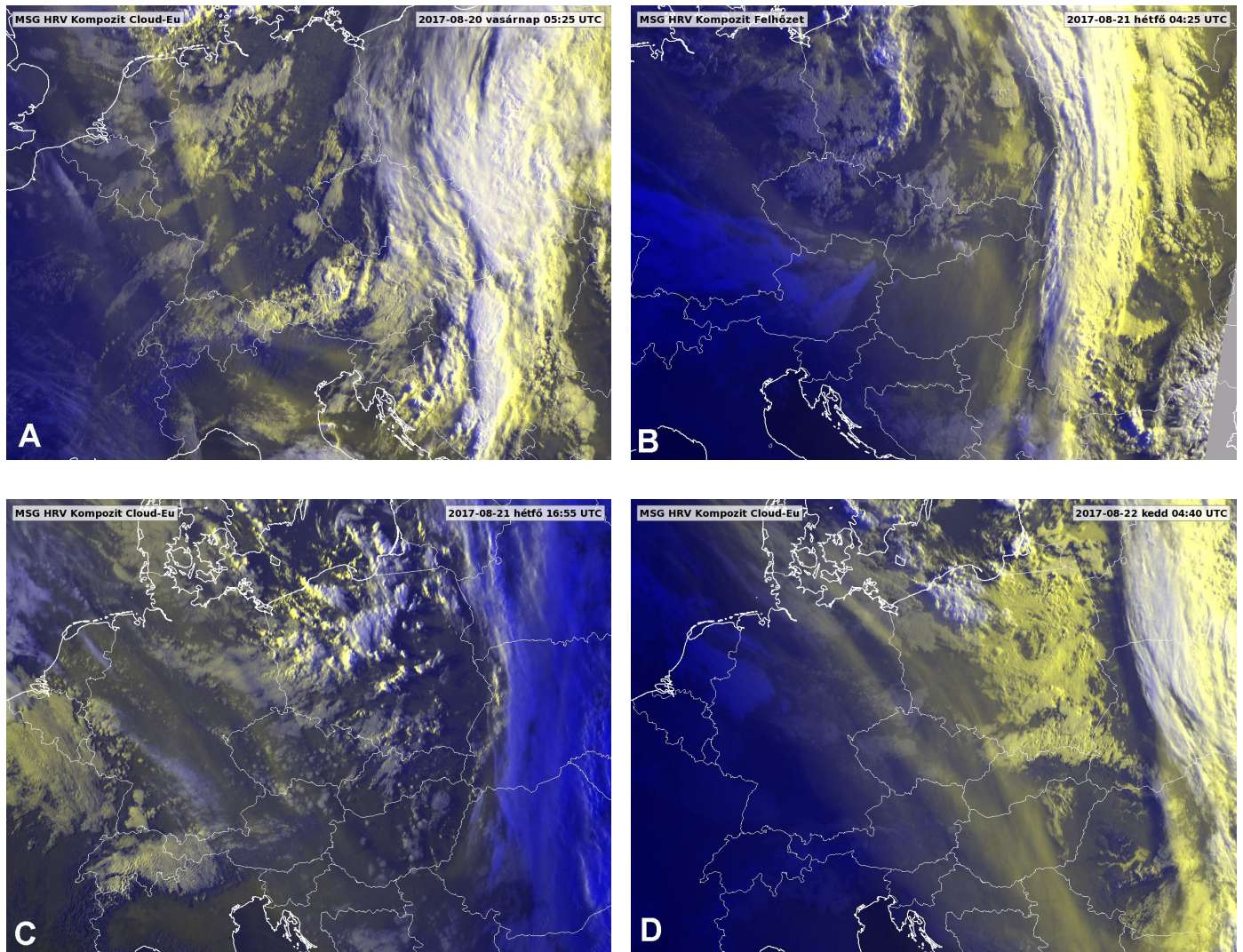
juttat fel füstöt, gázokat, aeroszolt a felső-troposzféra, al-
só-sztratoszféra tartományába. A sztratoszférába feljutó
füst ezután kimosódás nélkül tartósan a levegőben ma-
radva nagy távolságra jut el. Kanadában júliustól szept-
emberig több esetben is észlelhető volt zivatarfelhők ki-
törése épp az erdőtüzek gócpontjai fölött.

Detektálás műholdképeken, rekord nagyságú aeroszol index. Augusztus 12-én minden idők egyik legerősebb
pyroCb klaszterét detektálták Brit Kolumbiában (hasonló
zivatarfelhők és füst látható a 4. ábrán). A sztratoszférá-
ba csak ezen esemény során kb. 200 ezer tonna aeroszol
jutott fel, ami egy vulkán „teljesítményével” is össze-
mérhető (Fromm et al., 2018). A hullámhossz-függő szó-
ródás és elnyelődés alapján a légköri aeroszol „felhő” bi-
zonyos sugárzási tulajdonságai műholdas mérésekből
számszerűsíthetők. A közeli-ultraibolya (300–400 nm)
mérési tartomány használata több szempontból is előnyös
(Torres et al., 1998). Itt ugyanis, különösen a széntartal-
mú aeroszol típusok és az ásványi por, jelentős elnyelés-
sel rendelkeznek, a felszíni albedó alacsony és kevésbé
hullámhossz-függő. A gázok elnyelése ugyanakkor álta-
lában elhanyagolható, mindössze az ózon jelentősebb ab-
szorbens 330 nm hullámhossz alatt. Az egyik gyakran
hivatkozott műholdas paraméter az ún. aeroszol abszorpció-
s index (AAI), melynek nagysága egyszerre utal a su-
gárzást elnyelő aeroszol mennyiségére és annak magas-
sági elhelyezkedésére. Az optikailag vastagabb és na-
gyobb magasságban elhelyezkedő aeroszol esetén egyre
nagyobb index értékeket kapunk. A szóban forgó augusz-
tusi pyroCb felhők nyomán kikerült füst augusztus 14-től
Kanada északi része felett rendre rekord nagyságú index
értékeket produkált (NASA, 2017). Az AAI értéke 16-án
volt a legmagasabb, 55,4-es index értékkel. Megjegyez-
zük, hogy a kibocsátás után az aeroszol felhő vertikálisan
mind nagyobb magasságokba keveredhet fel, ennek kö-
szönhetően az aeroszol index értéke növekedhet is az el-
ső pár napban (Boers et al., 2010). A vizuális tartomány-
ban készült műholdképeken – különösen alacsony napál-
lás esetén – a füst jól követhető volt az észak-atlanti tér-
ség, majd augusztus 20-tól Közép-Európa felett is (5. áb-
ra).



4. ábra: Műholdkép az erdőtüzek feletti füsttel és pyroCb
felhőkkel augusztus 14-én. A piros négyzetek a műholdas „hot
pixeleket” mutatja, ami a tüzesetek pozícióinak felel meg.
Forrás: NASA, MODIS Aqua <https://earthdata.nasa.gov>

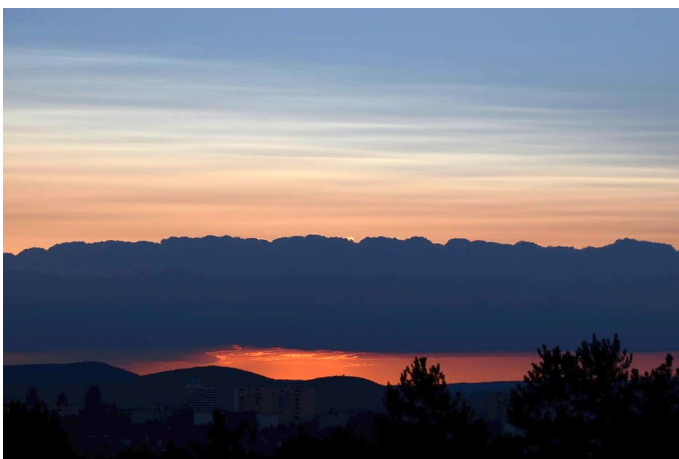
Szürkületi fényviszonyok, krepuszkuláris sugarak. A
magasban érkező füst első hulláma augusztus 20-án ér-
kezett az ország fölé. Vizuálisan naplementekor volt
szembetűnő a horizont feletti „koszos” sáv. A jelenségre
ekkor azonban még inkább csak a szemfülesebb észlelők
figyeltek fel. A horizont közelében lévő napmagasság
melletti megvilágítás sáv, hullámos szerkezet megjele-
nését hozta elő, ami már utalt a füstreteg nagyobb ma-
gasságára (6. ábra). A sokak figyelmét felkeltő, emléke-
zetes „show műsor” augusztus 22-én este volt látható az
északnyugati égbolton. Napnyugtakor az égbolt nagy ré-
szét magas szintű felhőnek tűnő sárgás, fehérés fátyol
borította be (7–8. ábra). Sokaknak valószínűleg fel sem
tűnt, hogy nem szokványos fátyolfelhőkről van szó. A
napi gyakorlatban használt infravörös kompozit műhold-
képek tanúsága szerint továbbra is derült volt felettünk az
ég, kizárhattuk a vékony jégfelhők jelenlétét. Napnyugta
időpontjában átmenetileg kissé csökkentek a kontrasztok



5. ábra: Műholdképek 2017 augusztusában.

Alacsony napállás esetén igen kontrasztos a magassági teknőt „körbefolyó” füst megjelenése.

A: augusztus 20-án reggel; B: augusztus 21-én reggel; C: augusztus 21-én este; D: augusztus 22-én reggel



6. ábra: Sávos, hullámos megjelenésű füst a magasban a nyugati horizont felett 2017. augusztus 20-án este.

Készítette: Landy-Gyebnár Mónika

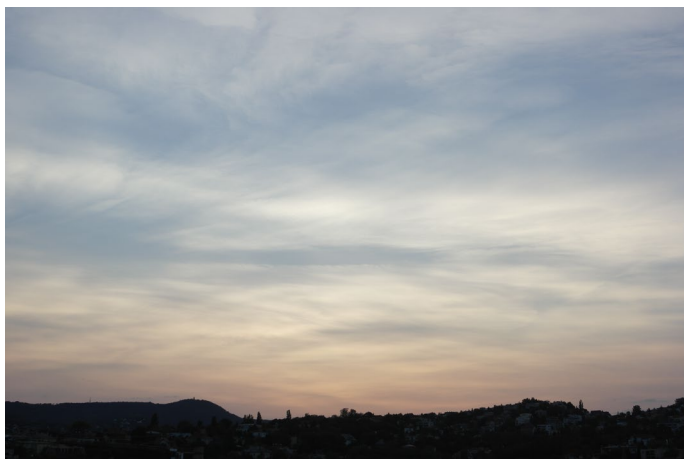


7. ábra: Sztratoszférikus füst réteg megjelenése Budapest felett 2017. augusztus 22-én naplementekor.

Készítette: Kolláth Kornél

a füst rétegen, majd különösen látványos, narancsban pompázó, hosszúra nyúlt alkonyati sugarak tűntek fel. Az árnyéksávok forrása (hegyek, felhők), melyről fölvetül

fény a füst rétegre, akár 500–600 kilométer távolságra is lehetett, valahol már Németország fölött. Hasonló jelenség vulkánkitörések után tapasztalható, amikor szintén a



8. ábra: Naplemente idején a füst réteg kiváló kontrasztokat, részleteket mutat. Készítette Kolláth Kornél

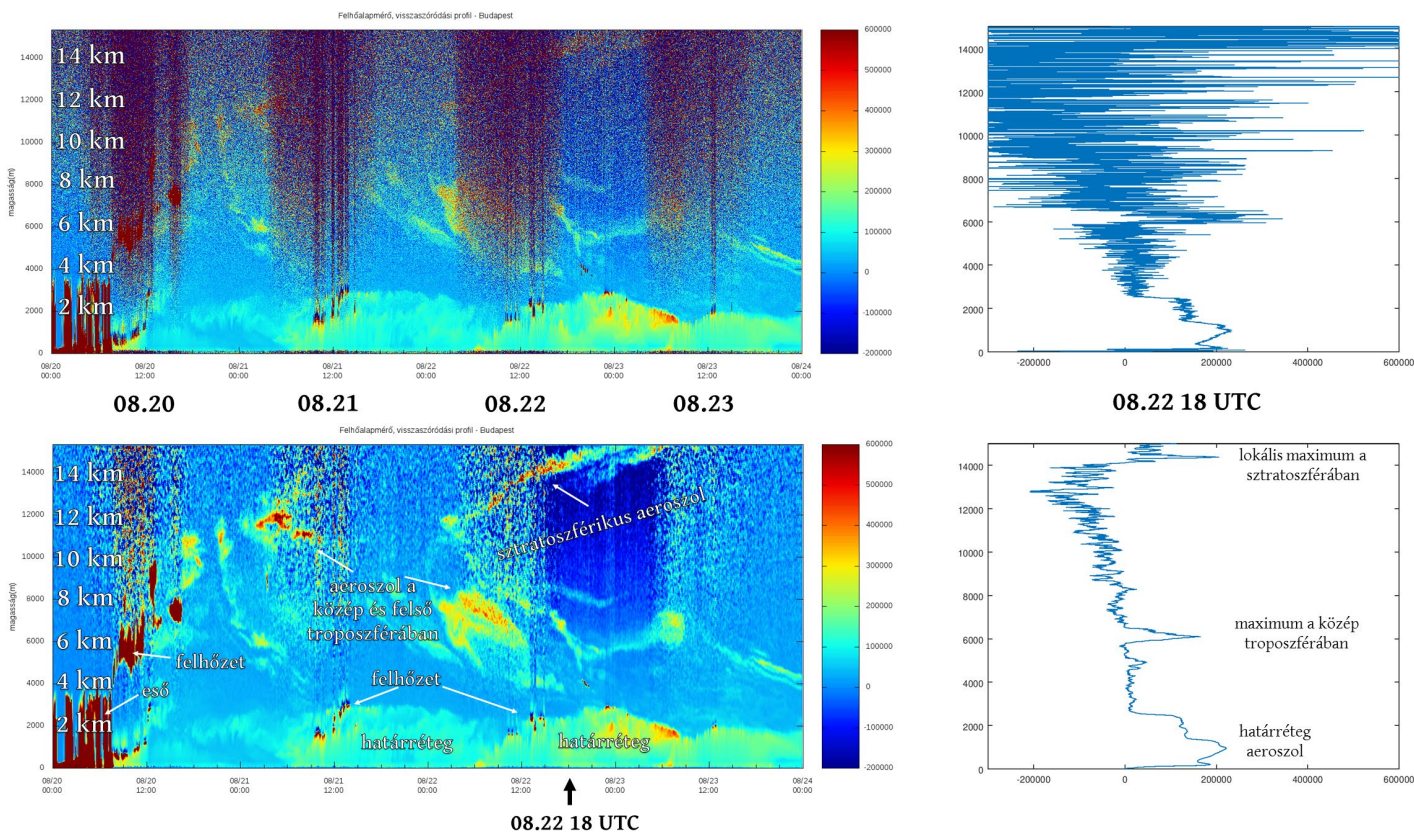


9. ábra: Szeptember 2-án a napkelte előtti fényviszonyok („vulkáni napkelte”) még mindig sztratoszférikus aeroszolra utalnak. Készítette: Kolláth Kornél

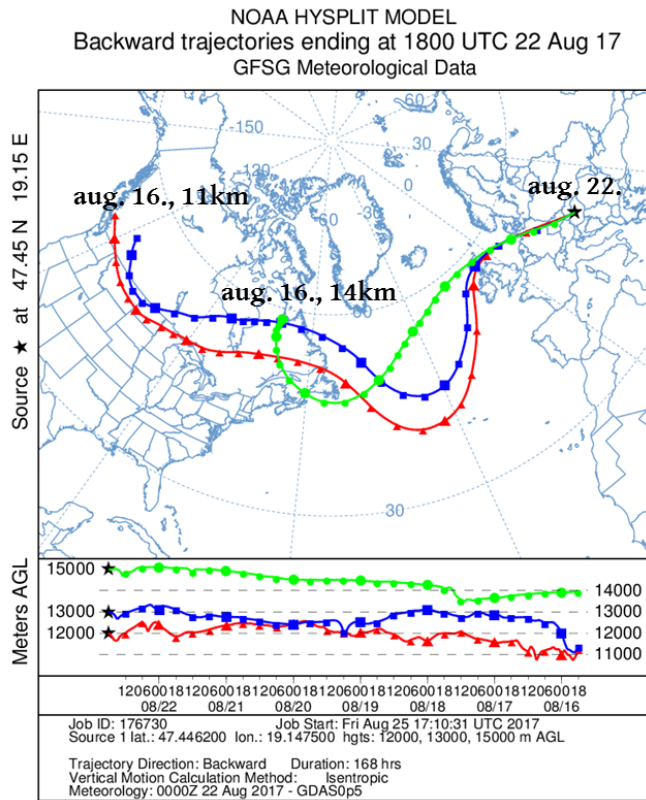
sztratoszféra aeroszolja világot meg a napfény, miközben a troposzféra már földárnyékban van. Hazánk fölött utoljára 2008-ban a *Kasatochi*, 2009-ben a *Szaricsev vulkán* kitörése nyomán láthatunk gyakran lilás árnyalatú „vulkáni naplementéket” (Landy-Gyebnár, 2009). Hasonló színárnyalatok augusztus végén, szeptember elején is felfedezhetők voltak napkelte, napnyugta idején (9. ábra). Érdekesség, hogy a szürkületi fényviszonyoknak – különösen a sztratoszférikus aeroszol jelenléte és magassága tükrében – gazdag irodalma van (Volz and Goody, 1962; Kumari et al., 2008). Manapság az olcsón elérhető digitális kamerákkal is meglepően sok információ ki-

nyerhető a légköri aeroszol profiljára vonatkozóan pusztán a szürkületi időszakban készült fotó sorozatok, illetve mérések alapján (Saito and Iwabuchi, 2015). Sőt a citizen science (magyarul közösségi tudomány) jegyében akár saját fotométert is készíthetünk kifejezetten az aeroszol réteg magasságának behatárolására (Mims, 2015).

Mit látott a felhőalpmérő? Az ún. lézeres felhőalpmérők a műszer által függőlegesen kibocsátott lézert fény visszaverődésének detektálásán alapul. A kisugárzott lézert impulzushoz képest a visszaverődő jelek intenzitásai és pontos időpontjai alapján vertikális profil alkotható a



10. ábra: A budapesti felhőalpmérő visszazóródási profilja, mint időbeni metszet augusztus 20-tól 23-ig (bal oldalt), illetve a 2017. augusztus 22. 18 UTC időpontban (jobb oldalt). A fenti diagramok a műszer nyers visszazóródási jeleiről mutatja, a lentebb a medián zajszűrés utáni értékek szerepelnek. A skála arányos a visszazóródó jelek távolsággal korrigált erősségével

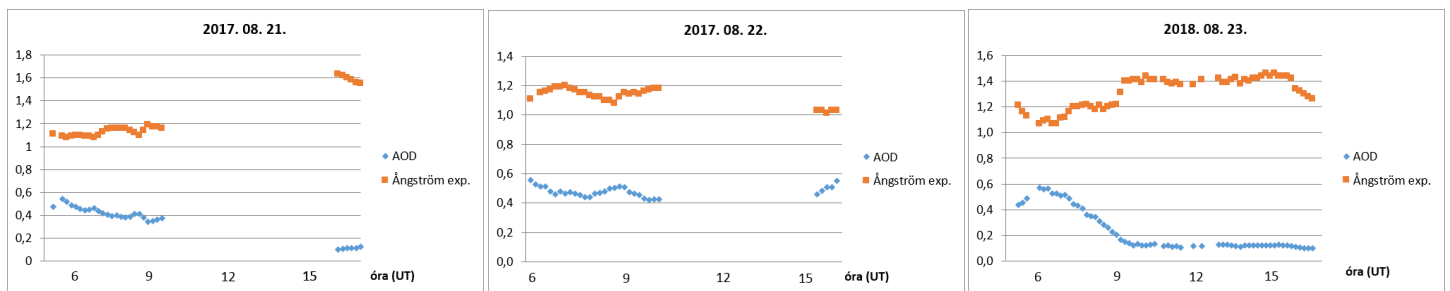


11. ábra: Backward légpályák augusztus 22-i indítással hat nappal visszafelé. Forrás: NOAA, Air Resources Laboratory, HYSPLIT model. <https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>

szóró részecskékre vonatkozóan. Az Országos Meteorológiai Szolgálatnál az utóbbi időben Lufft CHM15k típusú műszerek kerültek telepítésre. Az eszköz keskeny sáv szélességű szilárdtest-lézerforrást alkalmaz, 1064 nm hullámhosszúságú (közeli infravörös) tartományban. A detektáló rendszer része az avalanche fotodióda, ami egy nagyon érzékeny félvezető eszköz. A fotodióda a teleszkóp által összegyűjtött fotonokat mozgékony töltéshordozó párok sokszorosává alakítja át, így létrehozva az elektromos impulzusokat. A rendszer 1–2 ns-os jelkibocsátás mellett is képes a fotoelektronok regisztrálására, ami nagyban hozzájárul a mérések pontosságához. Bár a műszer a felhőalap magasság meghatározására optimalizált, a mérésekben jól elkülönül a planetáris határreteg aeroszol profilja, illetve extrém esetben az ennél jóval magasabban elhelyezkedő aeroszol rétegeket is képes detektálni. Fontos megemlíteni, hogy a felhőkben igen gyorsan elgyengül a kibocsátott jel, így gyakorlatilag egy optikailag vastagabb felhőréteg fölé már nem láthatunk. A 10. ábrán a budapesti felhőalpmérő méréseit láthatjuk az augusztus 20-tól 23-ig tartó időszakban, il-

letve egy kitüntetett időpontban 22-én este. Az ábrákon a műszer fölötti légkörből visszaverődő jelerősséget láthatjuk a magasság függvényében. A felhőkről és csapadékról lényegesen erősebb visszaverődések tapasztalhatók, így ehhez képest csak a relatíve gyengébb jelek a számunkra érdekesek. Különösen a magasból visszaverődő gyengébb jelek tartományában jelentős a zaj a nyers adatokban, ami medián zajsűrűssel nagyjából orvosolható. (Sajnos a nappali profilokban így is jelentős marad a zaj a közeli infravörösben is jelen lévő háttérsugárzás miatt.) 20-án a nap első felében még frontális felhőzet és csapadék látható a profilokban, ezt követően viszont néhány gomolyfelhőtől eltekintve csak különféle aeroszol rétegekről történő visszaverődések láthatók. A határreteg aeroszolja felett 4 km-től egészen a mérés határt jelentő 15 km-ig láthatunk sávokat. Két periódust különíthetünk el. Az első 20-án este, a második 22-e hajnalban kezdődik. Különösen az utóbbi lefutásában felfedezhető, hogy először 10–12 km környékén jelenik meg a nagyobb visszaverődés, mely fölött és alatt időben fokozatosan eltolódva érkezik a füst. Ezt hozzávetőlegesen a szélesség profiljával magyarázhatjuk (a tropopauza szintje felett és alatt gyengébb az áramlás). Figyelemre méltó, hogy az eltolódás szemmel láthatóan a 15 km-es mérés határ fölött is folytatódna. A légpálya számítások igazolták, hogy a bemért aeroszol rétegek valóban Kanada irányából jutottak el hozzánk (11. ábra).

Napspekrofotometriás mérések. Az Országos Meteorológiai Szolgálat Marcell György Főobszervatóriumában operatív módon folyik az aeroszol optikai mélység (AOD) mérése SolarSIM spektrofotométerrel a 368, 412, 500, 675, 862 és 1024 nm-es hullámhosszokon, ill. Brewer spektrofotométerrel a 320 nm-es hullámhosszon. A sugárzásátviteli problémákban az 500 nm-es AOD az általánosan használt. Ismert, hogy a 0,2 és 0,3 közé eső AOD értékek átlagosan szennyezett légműködést jelentenek, a 0,3-nál nagyobb értékek erősebben szennyezett, a 0,2 alattiak pedig kevésbé szennyezett, tisztább légműködést. Minél nagyobb az AOD értéke, annál kisebb a légkör sugárzásátbocsátó képessége, azaz gyengébb az átlátszótsága. Minden AOD spektrumból kiszámításra kerül az ún. Ångström exponens, ami a mérés során jelenlévő aeroszol részecskék méreteloszlására jellemző mennyiség. Ez tulajdonképpen nem más, mint az AOD spektrum „meredeksége”. Átlagosnak mondható méreteloszlás esetén értéke 1,3. Az ennél magasabb értékek egyre inkább az 500 nm-esnél kisebb sugarú részecskék dominanciáját jelentik az aeroszol össz mennyiségében, az 1,3 alattiak pedig a nagyobb méretű részecskékét. A 12.a–c ábrákon az



12. ábra: Aeorszol optikai mélység és Angström exponens 2017. augusztus 21-én (a), augusztus 22-én (b) és augusztus 23-án (c),

500 nm-es AOD és az Ångström exponens napi menete látható 2017. augusztus 21–23. napokon (21. és 22. esetén a nap egy részében felhő takarta a napkorongot, így ekkor nincsenek mérési eredmények). Jól látható, hogy 21-én a nap elején magas, 0,5 és 0,6 közötti volt az AOD érték a kanadai füstnek köszönhetően, majd délelőtt fokozatosan csökkent, és később már nem sokkal volt a légkör átlátszósága az átlagnál gyengébb. Az Ångström-exponens 1,1 körül volt a nap elején, ami a nagyobb részecskék dominanciáját mutatja. Késő délutánra a légkör átlátszósága kifejezetten nagy lett, és a lényegesen kisebb részecskék voltak jellemzők az aeroszolban. A napközbeni javulás összhangban volt azzal, hogy a magassági teknő tengelye Budapest fölé került (lásd az 5. ábra műholdképeit). 22-én reggel, délelőtt és késő délután is elég magas volt az AOD értéke, ami magas aeroszoltartalmat mutat. Hullámokban változott, és a napon belüli változékonysága számottevően nagyobb volt a megszokottnál. Az Ångström-exponens értékei (1,1–1,2) alapján a nagyobb részecskék voltak túlsúlyban. 23-án, nagyjából az előző nap este folytatásaként magas volt az AOD, és a nagy részecskék voltak többségben, de aztán gyorsan tisztulni kezdett a légkör, és kb. 10 UTC környékére már az átlagosnál is tisztább lett. Ekkor az aeroszolt már főleg kis részecskék alkották. A fentiekből arra következtethetünk, hogy a kanadai füst „sávos szerkezettel” haladt el hazánk felett, ahogy ez a felhőalpmérő visszaszóródási profiljából is látszik, és 23-án, a délelőtti folyamán nagy része már elhagyta az ország közepe feletti légréteget.

Összegzés. A 2017 augusztusában Közép-Európa fölé kerülő sztratoszférikus aeroszol mennyisége valószínűleg egyedülálló az elmúlt évtizedek idősorában. Az eset feldolgozásával más intézmények, kutatóközpontok is foglalkoztak. *Ansmann et al.* (2018) németországi mérések alapján összehasonlították az esetet más hasonló eseményekkel. Beszédesebb, hogy a Németország fölött a sztratoszférában mérhető legerősebb gyengítési együttható 20-szorosa volt az 1991-es Pinatubo vulkán kitörése utáni mért értékeknek. Ennek azonban fő oka az, hogy a füst a kibocsátás után a futóáramlás közelében az alsó sztratoszféra lamináris áramlási viszonyai között egy viszonylag keskeny zónában maradván jutott el Közép-Európa fölé, így útja során még csak keveset hígulhatott. A pyroCb felhők a globális klíma egy igen komplex működésű és hatású szereplői, melyben a kártevő rovaroktól kezdve az erdőtüzek és konvektív felhők kialakulásán keresztül eljutunk a sztratoszférában lebegő részecskék kémiájához, fizikájához. Érdemes tehát nyomon követnünk ezen – még fiatal – kutatási terület eredményeit. A hasonló esetek felbukkanásakor pedig legyünk résen, hogy hazai megfigyelésekkel is dokumentálhassuk az eseményt.

Köszönetnyilvánítás. Köszönjük a MET-ÉSZ észlelőinek, illetve a facebook *Légekoptika Csoportjának*, akik számtalan különleges févételt és beszámolót küldtek. Köszönet *Landy-Gyebnár Mónikának* és *Veres Viktor-nak*, akikkel együtt gondolkodtunk a jelenség egy-egy

aspektusán. Köszönjük *Salavec Péternek* az ötleteket az adatok feldolgozásával kapcsolatban.

Irodalom

- Ansmann, A. Baars, H., Chudnovsky, A., Mattis, I., Veselovskii, I., Haarig, M., Seifert, P., Engelmann, R., and Wandinger, U.*, 2018: Extreme levels of Canadian wildfire smoke in the stratosphere over central Europe on 21–22. 08. 2017. *Atmos. Chem. Phys.* 18, 11831–11845. doi:10.5194/acp-18-11831-2018
- Boers, R., de Laat, A. T., Stein Zweers, D. C., and Dirksen, R. J.*, 2010: Lifting potential of solar-heated aerosol layers. *Geophysical Research Letters*. 37, L24802. doi:10.1029/2010GL045171
- Bowman, D. M. J. S., Balch, J. K., Artaxo, P., Bond, W. J., Carlson, J. M., Cochrane, M. A., D’Antonio, C. M., DeFries, R. S., Doyle, J. C., Harrison, S. P., Johnston, F. H., Keeley, J. E., Krawchuk, M. A., Kull, C. A., Marston, J. B., Moritz, M. A., Prentice, I. C., Roos, C. I., Scott, A. C., Swetnam, T. W., van der Werf, G. R., and Pyne, S. J.* 2009: Fire in the Earth System. *Science*, 324, 481–484, <https://doi.org/10.1126/science.1163886>
- Evangelidou, N., Kylling, A., Eckhardt, S., Myroniuk, V., Stebel, K., Paugam, R., Zibtsev, S., and Stohl, A.*, 2018: Open fires in Greenland: an unusual event and its impact on the albedo of the Greenland Ice Sheet, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, doi:10.5194/acp-2018-94
- Fromm, M., Lindsey, D.T., Scrvranckx, R., Yue, G., Trickl, T., Sica, R., Doucet, P., GodinBeckmann, S.*, 2010: The untold story of pyrocumulus. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 91, 1193–1209
- Hart, S. J., Schoennagel, T., Veblen, T. T. and Chapman, T. B.*, 2016: Area burned in the western United States is unaffected by recent mountain pine beetle outbreaks. *National Academy of Sciences*, doi:10.1073/pnas.1424037112
- Hicke, J. A., Johnson, M. C., Hayes, J. L., Preisler, K.*, 2012. Effects of Bark Beetle-Caused Tree Mortality on Wildfire. *Forest Ecology and Management* 271, 81–90. doi:10.1016/j.foreco.2012.02.005
- Kumari, B. P., Kulkarni, S. H., Jadhav, D. B., Londhe, A. L and Trimbake. H. K.*, 2008: Exploring Atmospheric Aerosols by Twilight Photometry, *Indian Institute of Tropical Meteorology*, Pune, India. doi:10.1175/2008JTECHA1090.1
- Landy-Gyebnár, M.*, 2009: Színek és fények a nyári égen. *Meteor* 39 (9), 66–68.
- Mims III, F. M.* 2015: Measure the Altitude of Dust, Smog, Smoke, and Volcanic Aerosols. *Make magazine*, 44 & 45.
- NASA’s Earth Observatory*, 2017: Record breaking smoke over Canada. <https://earthobservatory.nasa.gov/images/90759/record-breaking-smoke-over-canada>
- Saito, M. and Iwabuchi, H.*, 2015: A new method of measuring aerosol optical properties from digital twilight photographs, *Atmos. Meas. Tech.* 8, 4295–4311, <https://doi.org/10.5194/amt-8-4295-2015>
- Torres, O., Bhartia, P. K., Herman, J. R., Ahmad, Z. and Gleason, J.*, 1998: Derivation of aerosol properties from satellite measurements of backscattered ultraviolet radiation: Theoretical basis. *J. Geophys. Res.*, 103, 17 099–17 110. doi:10.1029/98JD00900
- Veres, V.*, 2017: Ilyen naplementét még nem látott Budapesten. [zoom.hu. https://zoom.hu/hir/2017/08/23/ilyen-naplementet-meg-nem-latott-budapest/](https://zoom.hu/hir/2017/08/23/ilyen-naplementet-meg-nem-latott-budapest/)
- Volz, F. E. and Goody, R. M.*, 1962: The Intensity of the Twilight and Upper Atmospheric Dust. *Harvard University*, doi:10.1175/1520-0469(1962)019<0385:TIOTTA>2.0.CO;2