

Saharský prach nad Slovenskom

Mgr. Peter Hrabčák

**Slovenský hydrometeorologický ústav,
Aerologické a radiačné centrum Poprad - Gánovce**

Anotácia

Predkladaná práca analyzuje tri epizódy výskytu prachu zo Saharskej púšte nad územím Slovenskej republiky v prvom polroku 2016. V mesiaci február boli zaznamenané 3 takéto dni, v apríli ich bolo 7 v rade a v mesiaci jún 5. Rozličné štruktúry prachu boli detegované pomocou meraní mikropulzného lidar, ktorými disponuje Aerologické a radiačné centrum SHMÚ v Gánovciach. Spätné trajektórie prúdenia vzduchu z modelu HYPSPPLIT dokazujú saharský pôvod prachu.

Kľúčové slová: minerálny prach, Sahara, lidar, model HYPSPPLIT

Annotation

The present paper analyzes three episodes of occurrence of dust from the Sahara Desert over the territory of the Slovak Republic in the first half of 2016. Three days were detected in February, seven days in a row in April and five days in June. Different structures of dust were detected by using measurements of micropulse lidar, which is placed in the Upper Air and Radiation Centre of SHMI in Ganovce. Reverse trajectories of airflow from the model of HYSPLIT show Saharan origin of dust.

Key words: mineral dust, Sahara, lidar, HYPSPPLIT model

Abstract

The Sahara desert is a significant source of atmospheric aerosols which are classified by species as the mineral dust. Mineral dust is often present in the atmosphere. Except clouds, mineral dust represents the majority of atmospheric particles based on the weight in a global perspective. The African continent is responsible for about half of global emissions of mineral dust. Mineral dust emitted from North Africa subsequently affects adjacent, but also remotely regions. Its major part is transported westward over the Atlantic Ocean and over the Gulf of Guinea especially in the summer. But sometimes it happens that is transported across the Mediterranean to Southern and Central Europe, in exceptional cases up to Northern Europe.

In several scientific publications can be found results of research of Saharan dust observed over the Mediterranean or Europe, where played a key role lidar measurements. We did not find scientific work of Slovak or foreign authors that would be deal with the matter of detecting Saharan dust over the territory of Slovakia by lidar. The present study provides the first direct evidence of the existence and structure of the individual layers of Saharan dust over the Slovak Republic. Direct evidence is provided by a continuous measurement of vertical profiles of aerosols by Micropulse Lidar, which operates Upper Air and Radiation Centre of Slovak Hydrometeorological Institute (SHMI) in Ganovce near town of Poprad. Its coordinates are 49.03 ° N., 20.32 ° E. and the altitude is 701 meters above sea level.

Micropulse Lidar is in Ganovce in permanent 24-hour operation since 2015. This device emits electromagnetic radiation with a wavelength of 532 nm (green light) in the vertical direction into the atmosphere. Data are available with vertical resolution of 15 m and vertical profile is theoretically possible to obtain from a height of approximately 140 m up to 30 km above the measurement point. Evidence of origin of aerosols observed above the given area is provided by model HYPSPPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory model). It can reconstruct reverse trajectory of air flow at a point in space and time. HYSPLIT model is operated by NOAA's Air Resources Laboratory (ARL). Thanks to upper air measurements made twice a day by radiosonde, we support our research by information on humidity of air. This information helps in recognizing different types of aerosols. Use of aerological measurements of vertical profiles of humidity aims to distinguish dust particles and clouds.

In the first half of year 2016 were observed three episodes of occurrence of Saharan dust over the territory of the Slovak Republic. It happened in the month of February (minimum 3 days), in April (7 days in a row) and in June (5 days). In summary, it was 15 days in the first half of year 2016, which is a remarkable number. The first period was in February, more specifically in the second half of month. On the 20th of February lidar detected Saharan dust for roughly four hour. Other evidence suggests (satellite measurements and observations at stations of SHMI), that the dust from the Sahara was over Slovakia in the air also on the 23rd of February and on the 29th of February.

In terms of lidar measurements, the situation was particularly interesting in April and June. In early April, we observed the dust from the Sahara in seven days in a row, starting on the 2nd of April and ending on the 8th of April. In this series of seven days, we observed its incidence in the boundary layer of the atmosphere, but also in the free atmosphere. Maximum altitude in which dust was observed was about eight kilometers. The maximum thickness of dust reached to about 5 km. This happened on the 3rd of April. More significant layers of dust were registered also in June, mainly on the 16th of June and on the 17th of June. The maximum thickness of the layer of dust was observed on the 17th of June, it was 5 km, which is the same value of maximum like during the April situation. A little bit later, less pronounced layers of dust were detected, it was from the 20th of June to the 22nd of June.

1 Úvod

Saharská púšť je najväčšou piesočno-kamenistou púšťou sveta s rozlohou 9,4 mil. km². Je významným zdrojom atmosférických aerosólov, ktoré druhovo zatriedujeme do skupiny minerálneho prachu. Minerálny prach je v atmosfére veľmi často prítomný a z globálneho pohľadu (vyjmúc oblačnosť) predstavuje vzhľadom na hmotnosť väčšinu atmosférických častíc (Huneeus et al., 2012). Africký kontinent (najmä Sahara a Sahel) je zodpovedný za približne polovicu globálnej emisie minerálneho prachu (Huneeus et al., 2011). Podľa odhadov Engelstaedtera et al. (2006) severoafrický región ročne emituje od 170 do 1600 Tg (teragram) prachu.

Minerálny prach emitovaný zo severnej Afriky následne ovplyvňuje priľahlé, ale aj veľmi vzdialené regióny. Jeho prevažná časť je transportovaná smerom na západ nad oblasť Atlantického oceánu (Barkan et al., 2004), a najmä v letnom období aj nad Guinejský záliv (Koren et al., 2003). Niekedy sa však stáva, že je transportovaný cez Stredozemné more do južnej a strednej Európy (Papayannis et al., 2008), vo výnimočných prípadoch až do severnej Európy. Známe sú prípady, keď sa dostal až nad Baltické more (Ansmann et al., 2003).

Vo viacerých vedeckých publikáciách môžeme nájsť výsledky výskumu saharského prachu pozorovaného nad Stredomorím alebo Európou, pri ktorom zohrávali kľúčovú rolu merania lidarom (Papayannis, A., et al. 2008, Pitari, G., et al. 2015). V práci Pappalarda, G., et al. (2010) boli prvýkrát publikované poznatky zo vzájomného porovnania satelitných meraní prístrojmi CALIOP (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization) s pozemnými meraniami v Taliansku a Nemecku v rámci siete EARLINET (European Aerosol Research Lidar Network). Pomocou lidarom CALIOP na zemskej orbite boli v nedávnej štúdiu Yu, H., et al. (2015) prezentované odhady depozície afrického prachu v oblastiach Amazonského dažďového pralesa. Pre sedemročné obdobie 2007 – 2013 bola priemerná depozícia 28 (8–48) Tg ročne. Produktivita Amazonského pralesa je obmedzená dostupnosťou živín, najmä fosforu. Táto štúdia zistila, že priemerné ročné hydrologické straty fosforu sú porovnateľné s jeho tokom do danej oblasti prostredníctvom afrického prachu.

Nenašli sme prácu slovenských alebo zahraničných autorov, ktorá by sa bližšie venovala problematike detekcie saharského prachu nad územím Slovenska pomocou lidarom. Predkladaná štúdia ako prvá prináša priame dôkazy o výskyte a štruktúre jednotlivých vrstiev saharského prachu nad Slovenskom. Priamy dôkaz zabezpečujú časovo kontinuálne merania vertikálneho profilu aerosólov mikropulzným lidarom, ktorý prevádzkuje Aerologické a radiačné centrum SHMÚ v Gánovciach pri Poprade. Vďaka aerologickým meraniam, vykonávaným dvakrát denne, sme náš výskum podporili aj informáciami o vlhkosti vzduchu, ktorá je pri rozoznávaní jednotlivých druhov aerosólov obzvlášť dôležitá. Dôkaz o pôvode aerosólov pozorovaných nad našim územím nám poskytol model HYPSPPLIT, ktorý dokáže zrekonštruovať spätné trajektórie prúdenia vzduchu z určitého bodu v priestore a čase.

V nasledujúcom texte postupne predstavíme metodiku našej práce. Táto časť obsahuje popis lokality Gánoviec pri Poprade, kde sa merania vykonávajú. Ďalej v stručnosti opisuje základný princíp merania mikropulzného lidarom, výstupy z modelu HYPSPPLIT a rádiosondážne merania. Časť výsledky a diskusia je venovaná hlavne analýze vybraných vertikálnych profilov aerosólov. Dôraz bol kladený na dni, počas ktorých bolo možné bez výraznejšieho vplyvu oblačnosti detegovať vo vzduchu prach zo Sahary. Využitie aerologických meraní vertikálnych profilov vlhkosti vzduchu má za cieľ odlíšiť prachové častice od oblačnosti. Spätné trajektórie horizontálnych a vertikálnych pohybov vzduchu získané prostredníctvom modelu HYPSPPLIT obohacujú naše výsledky o cenné dôkazy pôvodu prachu a jeho ceste až nad územie Slovenskej republiky. Dokážu nám poodhaliť nielen trasu a trvanie transportu saharského prachu, ale aj spôsob akým došlo k jeho vyzdvihnutiu zo zemskeho povrchu.

2 Metodika

2.1 Opis lokality merania

Mikropulzný lidar je umiestnený na vyvýšenej vstupnej terase Aerologického a radiačného centra SHMÚ v Gánovciach pri Poprade. Jeho súradnice sú $49,03^\circ$ s. z. š a $20,32^\circ$ v. z. d. a nadmorská výška je 701 m. n. m. Obsah aerosólov v ovzduší či už celkové množstvo alebo aj druhové zloženie determinujú na jednej strane lokálne zdroje a na strane druhej atmosférické prúdenie, ktoré dokáže určitú vzduchovú hmotu spolu s aerosólmi premiestniť aj o niekoľko tisíc kilometrov. V ojedinelých prípadoch tu môže ísť napríklad aj o transport saharského prachu. Medzi významnejšie lokálne zdroje v oblasti Gánovce patria produkty spaľovania dreva a uhlia v okolitých obciach (najmä v chladnom polroku) a poľnohospodárstvo, keďže v tesnej blízkosti stanice sú rozsiahle poľnohospodársky obrábané plochy. Ide tu najmä o odvíevanie holej suchej pôdy alebo rastlinných produktov vetrom, keďže lokalita je pomerne veterná. Hlavne v jarnom období je v ovzduší významnejšie zastúpený aj peľ z kvitnúcich rastlín. Blízkosť mesta Poprad (cca 1,5 km) s asi 53 000 obyvateľmi a rôznymi priemyselnými aktivitami tiež zohráva svoju úlohu.

2.2 Merania mikropulzného lidaru

Mikropulzný lidar je v Gánovciach pri Poprade v stálej 24 hodinovej prevádzke od roku 2015. Tento prístroj emituje vo vertikálnom smere do atmosféry elektromagnetické žiarenie s vlnovou dĺžkou 532 nm (zelené svetlo). V noci môžeme očami vidieť zelený laserový stĺp s priemerom 20 cm, ktorý vychádza z teleskopu. Približne 1 meter vysoký teleskop je súčasťou lidaru a slúži na vysielanie, a zároveň aj prijímanie elektromagnetického žiarenia. Celková divergencia laserového lúča je iba 55 μ rad. Tok žiarenia nie je kontinuálny, ide o mikropulzy s trvaním menej ako 15 ns. Energia jedného mikropulzu je okolo 15 μ J. Frekvencia vysielania mikropulzov je 4,7 kHz a priemerný výkon lasera sa pohybuje okolo 75 mW. Prístroj je umiestnený v termálnom kryte, v ktorom je udržiavaná stabilná teplota 20 ± 2 °C.

Údaje sú k dispozícii s rozlíšením 15 m a teoreticky je možné vertikálny profil získať od výšky približne 140 m až do výšky 30 km nad miestom merania. V tejto prípadovej štúdii sú na obrázkoch prezentované vertikálne profily pre jednotlivé dni, od výšky 140 m do výšky približne 12 km nad miestom merania. Časové rozlíšenie vertikálnych profilov je približne jedna minúta. Základným výstupom mikropulzného lidaru je digitalny počet (počet impulzov zachytených elektronickým počítacím zariadením) prislúchajúci jednotlivým vzdialenostiam od lidaru. Čím viac častíc sa v danej výške nachádza, tým väčší signál je z tejto výšky teoreticky schopný prísť, avšak samotný lúč je prechodom cez atmosféru postupne utlmovaný a aj vzhľadom na tento útlm a fyzikálne parametre prístroja je potrebné údaje ďalej korigovať. Na tento účel bol použitý softvér iAAMS Lab. 2.0.26 od firmy Cimel, ktorá je výrobcom mikropulzného lidaru.

Spracovanie surových údajov pomocou spomenutého softvéru prebieha v postupnosti jednotlivých krokov. Najskôr sa surové údaje (digitálny počet) prepočítajú na intenzitu žiarenia vyjadrenú počtom fotónov. V ďalšom kroku sa pri výpočte aplikuje tzv. lidarová rovnica (C i m e l – advanced monitoring, 2011):

$$I(z, \lambda) = I_0(0, \lambda) \frac{A_0}{z^2} \beta(z, \lambda) \Delta z \chi(z, \lambda) \exp\left(-2 \int_0^z \alpha_{ext}(z, \lambda) dz\right)$$

- ❖ $I(z, \lambda)$ je intenzita spätne rozptýleného žiarenia vo vzdialenosti z od lidararu pre vlnovú dĺžku λ (viacnásobný rozptyl je v rovnici zanedbaný)
- ❖ $I_0(0, \lambda)$ je intenzita emitovaného žiarenia laserom, pre vlnovú dĺžku λ
- ❖ A_0/z^2 je priestorový uhol detekcie optického prijímača (A_0 je efektívny povrch detekcie pre teleskop)
- ❖ $\beta(z, \lambda)$ celkový objemový koeficient spätného rozptylu
- ❖ $\Delta z = c \Delta\tau/2$ je priestorové rozlíšenie a $\Delta\tau$ je trvanie jedného mikropulzu
- ❖ $\chi(z, \lambda) = \kappa(\lambda) Y(z)$ je účinnosť detekcie, kde $Y(z)$ predstavuje prekrytie (overlap) medzi zorným poľom vysielača a prijímača a $\kappa(\lambda)$ je faktor spektrálnej priepustnosti detekčného systému
- ❖ $\exp(-2 \int_0^z \alpha_{ext}(z, \lambda) dz)$ vyjadruje Beer-Lambertov zákon medzi vzdialenosťou 0 a z , kde $\alpha_{ext}(z, \lambda)$ je koeficient celkového atmosférického útlmu

Základným predpokladom pri riešení lidarovej rovnice je v našom prípade nemennosť vlnovej dĺžky λ , čiže predpoklad pružného rozptylu. Získaná intenzita spätne rozptýleného žiarenia $I(z, \lambda)$, ďalej vďaka predpokladu už iba $I(z)$, vyjadrená počtom fotónov, sa ešte koriguje vzhľadom na vzdialenosť od lidararu:

$$L(z) = I(z) z^2$$

Výsledkom je $L(z)$, čiže relatívny koeficient spätného rozptylu korigovaný vzhľadom na vzdialenosť od lidararu. Na záver je ešte potrebné od $L(z)$ odrátať príspevok molekúl vzduchu. Konečným výsledkom je relatívny koeficient spätného rozptylu aerosólov, korigovaný vzhľadom na vzdialenosť od lidararu (jednotkou je: počet fotónov * m²). Skrátene ho môžeme nazývať vertikálny profil aerosólov. Je dôležité si uvedomiť, že tu ide o vertikálny profil vybranej optickej vlastnosti aerosólov a nie o vertikálny profil ich hmotnostnej koncentrácie. Aj napriek tomu je to veľmi užitočný produkt, ktorý nám poskytuje presnú informáciu o výške, v ktorej sa nachádzajú častice. Navyše máme informáciu o tom, koľko energie nám dané častice „vracajú späť“, a to nám umožňuje aspoň približne odhadnúť aj relatívne množstvo detegovaných častíc.

Vertikálne profily aerosólov pre jednotlivé dni sú na nasledujúcich obrázkoch znázornené v lineárnej mierke. Prvý obrázok je prezentovaný spoločne s použitou farebnou škálou. Na ďalších obrázkoch je škála rovnaká, preto ju už neuvádzame. V hornej časti farebnej škály je znázornené maximum relatívneho koeficientu spätného rozptylu aerosólov korigovaného vzhľadom na vzdialenosť od lidararu a v spodnej časti je jeho minimum.

2.3 Výstupy z modelu HYPSPPLIT

Model HYPSPPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model) prevádzkuje NOAA Air Resources Laboratory (ARL). Tento model umožňuje výpočet jednoduchých

trajektórií pre jednotlivé vrstvy vzduchu, ale aj komplexný transport, disperziu, chemickú transformáciu a depozíciu pre rôzne simulácie (Stein et al., 2015, Rolph, 2016). Využitie modelu HYPSPPLIT pre našu prípadovú štúdiu spočíva v jeho možnosti generovať spätné trajektórie prúdenia vzduchu pre určité miesto a určitý čas. V prípade miesta išlo stále o pracovisko v Gánovciach pri Poprade, do modelu však boli zadávané rôzne výšky nad terénom. Pri výpočte spätných trajektórií sme využili Global Data Assimilation System (GDAS) s rozlíšením 1° , preto terén leží v nadmorskej výške 804 m. n. m., čo je o cca 100 m viac ako nadmorská výška prístroja. Tento fakt má na našu analýzu malý vplyv, no aj tak sme ho pri nej zohľadnili.

Výstupy z modelu sú prezentované na jednotlivých obrázkoch. V ich hornej časti sú uvedené horizontálne a v spodnej časti vertikálne pohyby vzduchu. Výška v spodnej časti reprezentuje výšku nad terénom. Takýto prístup je prospešný hlavne z dôvodu detekcie miesta na zemskom povrchu, z ktorého mohol byť vyzdvihnutý saharský prach.

2.4 Rádiosondážne výstupy

Využitie aerologických meraní, v našom prípade hlavne relatívnej vlhkosti vzduchu, umožňuje v niektorých prípadoch rozlíšiť oblačnosť od aerosólov iného druhu. Ak je relatívna vlhkosť vzduchu v určitom profile dostatočne nižšia ako 100 %, dokážeme vylúčiť výskyt kvapalných aerosólov, teda malých vodných kvapôčok tvoriacich oblačnosť. U ľadových kryštálikov je to už ale menej isté. Rádiosondážne výstupy sa v Gánovciach pri Poprade vykonávajú v štandardných termínoch, dvakrát denne. Ich začiatok je v čase 23:15 UTC a 11:15 UTC. V období spracovanom v našej prípadovej štúdiu sa používala rádiosonda Vaisala typu RS92. Pre úroveň spoľahlivosti 2 sigma (95,5 %) je celková chyba merania relatívnej vlhkosti vzduchu touto sondou maximálne 5 % (v jednotkách relatívnej vlhkosti), preto relatívnu vlhkosť vzduchu 95 % môžeme považovať za približnú hranicu pod ktorou je výskyt kvapalných aerosólov málo pravdepodobný.

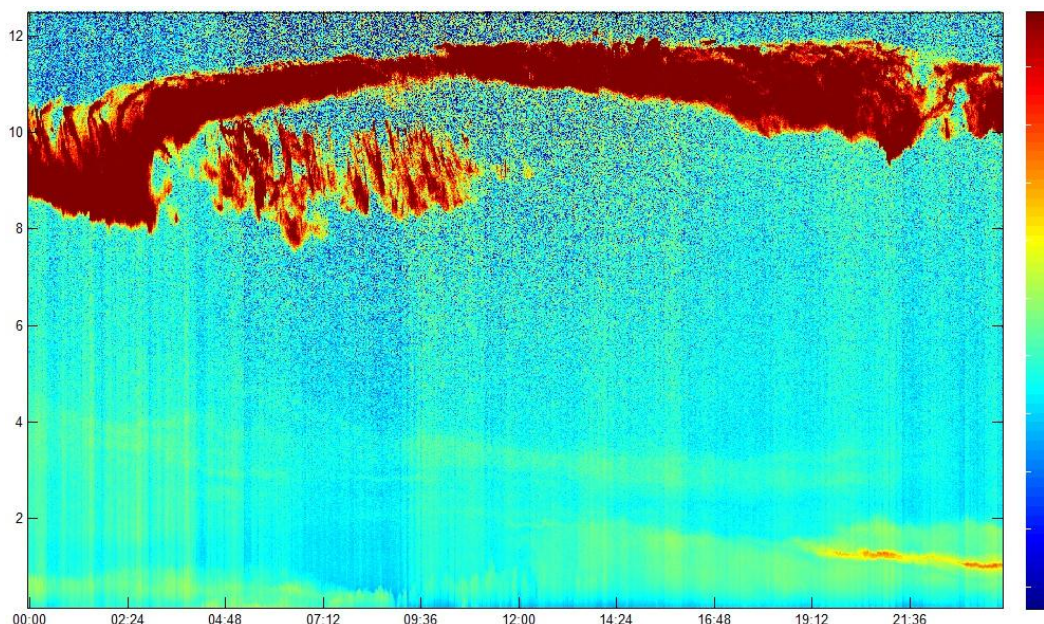
3 Výsledky a diskusia

V prvom polroku 2016 sa vyskytli tri obdobia počas ktorých bol nad územím Slovenskej republiky zaznamenaný prach zo Saharskej púšte. Prvé obdobie nastalo v mesiaci február, presnejšie v jeho druhej polovici. Prostredníctvom lidarů sa na zhruba štyri hodinu podarilo detegovať saharský prach dňa 20.2. Saharský pôvod aerosólov potvrdzuje aj výstup z modelu HYPSPPLIT. Je takmer isté, že v druhej polovici februára nešlo iba o jeden deň, ale nevhodné poveternostné podmienky (oblačnosť) zamedzili dokázať to aj prostredníctvom meraní lidarů. Z iných dôkazov vyplýva (satelitné merania a pozorovania na staniách SHMÚ), že prach zo Sahary bol nad Slovenskom vo vzduchu aj 23. a 29. februára. Hlavnou príčinou bola viackrát sa opakujúca vhodná poveternostná situácia, pre ktorú bol typický výskyt rozsiahlej brázdy nízkeho tlaku vzduchu siahajúcej zo severu až nad africký kontinent.

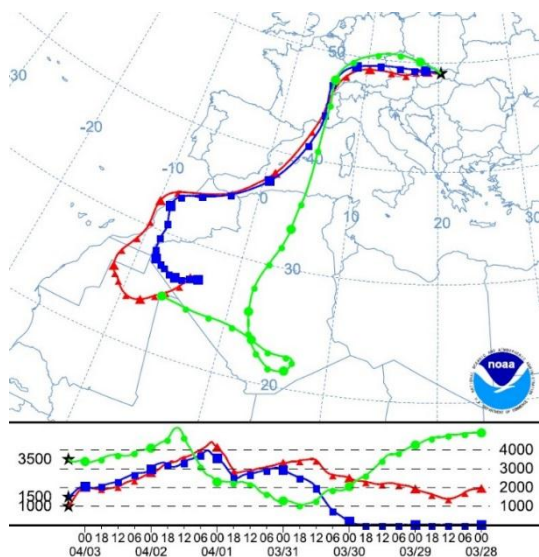
Druhé obdobie s výskytom saharského prachu bolo zaznamenané na začiatku apríla. Z pohľadu meraní pomocou lidarů nastala oveľa priaznivejšia situácia v porovnaní s februárom, pretože bolo menej oblačnosti. Výskyt saharského prachu nad Slovenskom bol spôsobený vhodnou poveternostnou situáciou. Tá spočívala v preniknutí studeného, pôvodom arktického vzduchu nad africký kontinent. Studený vzduch sa nad Afriku dostával vo viacerých vlnách. Po prechode ponad

Atlantický oceán sa stal výrazne instabilnejším a vďaka tejto jeho vlastnosti mohla neskôr nad africkou pevninou prebiehať výrazná konvekcia a turbulencia vzduchu, ktorá vyzdvihla prach a piesok z púštnych oblastí do veľkých výšok. Transport nad Európu bol následne spôsobený prúdením tropického vzduchu (pôvodom z Afriky) na prednej strane rozsiahlej brázd nízkeho tlaku vzduchu vo vyšších vrstvách atmosféry nad východným Atlantikom a západnou Európou.

Pravdepodobne prvým dňom tejto prípadovej štúdie, keď sa nad Slovensko dostal prach zo Sahary bol 2. apríl 2016 (Obr. 1). V tento deň sme tiež zaznamenali výskyt vysokej oblačnosti druhu cirrus, cirrostratus a cirrokumululus. Neobvykle vysoká horná hranica oblačnosti detegovaná prostredníctvom lidar predznamenávala prúdenie tropického vzduchu z nižších zemepisných šírok, ktoré bolo typické pre nadchádzajúce dni. Na obrázku, ktorý znázorňuje vertikálny profil aerosólov za jeden deň (čas je UTC) si môžeme všimnúť výskyt spomínanej oblačnosti vo výškach približne od 8 do 12 kilometrov nad zemským povrchom. Detekcia oblačnosti (vodné kvapôčky, kryštálky ľadu) prostredníctvom lidar sa väčšinou vyznačuje veľmi vysokými hodnotami spätného rozptylu emitovaného žiarenia. Na obrázku to charakterizuje veľmi tmavá farba. Vzhľadom na nadmorskú výšku miesta merania (701 m. n. m.) môžeme tvrdiť, že horná hranica oblačnosti sa vyskytovala v nadmorskej výške až takmer 13 km.

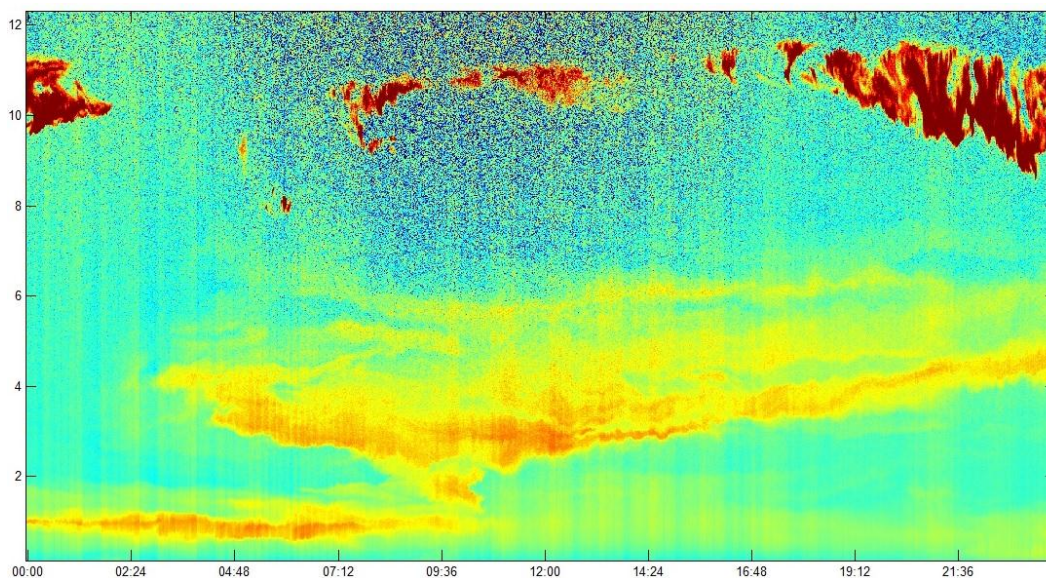


Obrázok 1. Relatívny koeficient spätného rozptylu aerosólov korigovaný vzhľadom na vzdialenosť od lidar (532 nm), $I(z) * z^2$ [počet fotónov * m^2] (skrátene: vertikálny profil aerosólov) dňa 2.4.2016 UTC, horizontálna os reprezentuje čas a vertikálna os vzdialenosť od zemského povrchu



Vyššie hodnoty spätného rozptylu žiarenia emitovaného lidarom je možné vidieť aj pár hodín pred polnocou vo výške okolo 1 km nad zemským povrchom. Relatívne tenký pás sa začína objavovať približne o 20:00 UTC. Nasledujúci deň (Obr. 3) tento pás pokračuje až do zhruba 10:00 UTC. Aj keď výstup z modelu HYPSPPLIT ešte nepredpokladá pre čas 00:00 UTC prúdenie vzduchu zo Sahary, ale v neskoršom termíne, presnejšie o 06:00 UTC je na jeho výsledkoch (Obr. 2) jednoznačne vidieť pôvod vzduchu zo západnej Sahary.

Obrázok 2. Spätné trajektórie pohybu vzduchu z výšky 1 km nad terénom (trojuholníky), 1,5 km nad terénom (štvorce) a 3,5 km nad terénom (kruhy), v čase 06:00 UTC 3.4.2016, 150 hodín dozadu, NOAA HYPSPPLIT MODEL
 Dokonca pre výšku 1,5 km nad terénom vzduch pochádza z tesnej blízkosti zemského povrchu. Môžeme si to všimnúť v spodnej časti obrázka. Práve na základe kontinuálneho výskytu aerosólov vo výške okolo 1 km nad terénom aj pred 06:00 UTC môžeme predpokladať, že aj aerosól na sklonku predošlého dňa pochádzal zo Sahary. K nášmu tvrdeniu sa prikláňa aj fakt, že pri rádi sondážnom výstupe so začiatkom v čase 23:15 UTC 2.4.2016, pri ktorom sonda prechádzala oblasťou nášho záujmu, bola nameraná relatívna vlhkosť vzduchu maximálne 87 %. Tento ďalší dôkaz výskyt kvapalných častíc s relatívne dosť veľkou pravdepodobnosťou nepredpokladá, ale ani ich úplne nevylučuje.

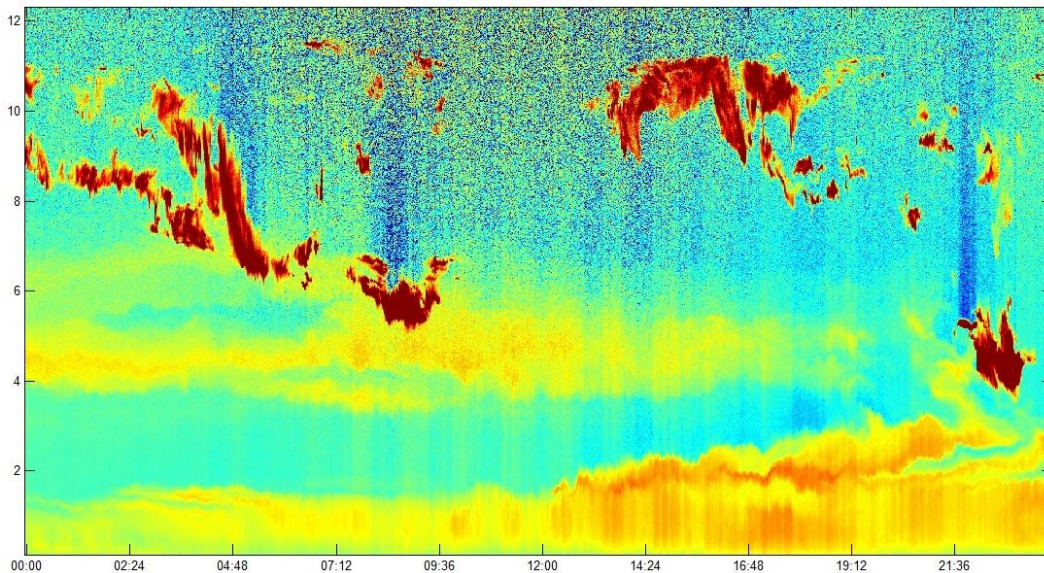


Obrázok 3. Vertikálny profil aerosólov dňa 3.4.2016 UTC

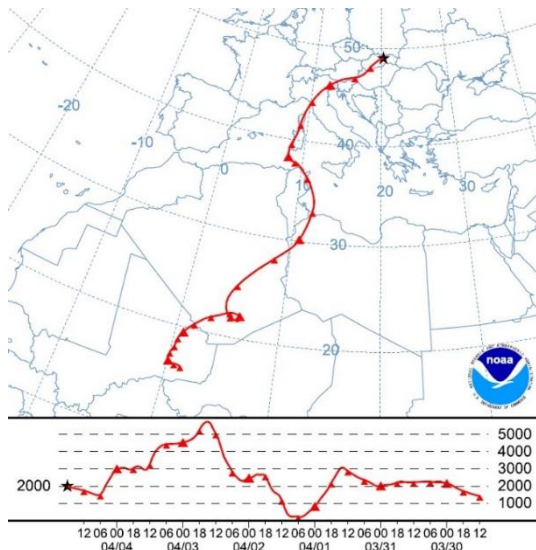
3. apríla (Obr. 3) okrem vysokej oblačnosti detegovanej prevažne od výšky 8 km nad terénom a aerosólového pásu vo výške okolo 1 km, zreteľne vidieť aj ďalšiu oblasť s vyššími hodnotami spätného rozptylu. Táto oblasť sa objavuje približne v čase 03:00 UTC vo výške cca 4 km nad terénom. V priebehu dňa sa šírka tejto vrstvy prachu a jej vzdialenosť od zemského povrchu mení, pričom predpoludním postupne dochádza k jej prepojeniu s nižšie ležiacou, už spomínanou vrstvou, ktorá sa ale postupne úplne vytráca. Napríklad v čase okolo 09:30 UTC siahala vrstva prachu od výšky cca 1 km až do výšky cca 6 km nad zemským povrchom, takže jej hrúbka bola cca 5 km. Na vertikálnom profile aerosólov (Obr. 3) si je dobré všimnúť to, že prach zo Sahary nie je vo vzduchu rozptýlený homogénne, ale v čase a priestore pozorujeme oblasti s jeho väčším a menším zastúpením. Najvyššie hodnoty spätného rozptylu sme zaznamenali okolo poludnia vo výške okolo 3 km nad povrchom. Dôkaz o výskyte čisto pevných aerosólov (prach) a nie kvapalných (vodné kvapôčky) nám poskytuje rádi sondážny výstup so začiatkom v čase 11:15 UTC, v priebehu ktorého do výšky 9 km nad povrchom bola zaznamenaná maximálna relatívna vlhkosť vzduchu s hodnotou len 50 %.

Nasledujúci deň, štvrtého apríla (Obr. 4), sme zaznamenali vrstvu prachu nadväzujúcu na predošlý deň. Vyskytovala sa vo voľnej atmosfére, prevažne vo výške 4 až 6 km nad povrchom a na niektorých miestach sa dostávala aj do kontaktu s oblačnosťou. Druhú významnú oblasť výskytu prachu pozorujeme v hraničnej vrstve. Zastúpenie aerosólov sa v tejto časti atmosféry v priebehu dňa stáva čoraz viac významným. Popoludní už pozorujeme veľmi vysoké hodnoty spätného rozptylu

takmer v celej hraničnej vrstve atmosféry. Na základe rádi sondážnych výstupov v štandardných termínoch môžeme predpokladať, že častice v oblasti hraničnej vrstvy detegované lidarom sú počas celého dňa pevné (prach), pretože relatívna vlhkosť vzduchu vo všetkých troch termínoch, ktoré pripadajú do úvahy, dosiahla v oblasti hraničnej vrstvy maximálne 87 % (v termíne 11:15 UTC iba 71 %). Aj tu prevažuje saharský pôvod častíc, keďže však ide o hraničnú vrstvu určite je v aerosóle významný príspevok častíc z lokálnej oblasti. Popoludní sú už prachové častice zo Sahary evidentne pozorované aj v tesnej blízkosti zemského povrchu a vrstva, v ktorej sa nachádzajú siaha do výšky aj vyše dvoch kilometrov nad miestom merania.



Obrázok 4. Vertikálny profil aerosólov dňa 4.4.2016 UTC

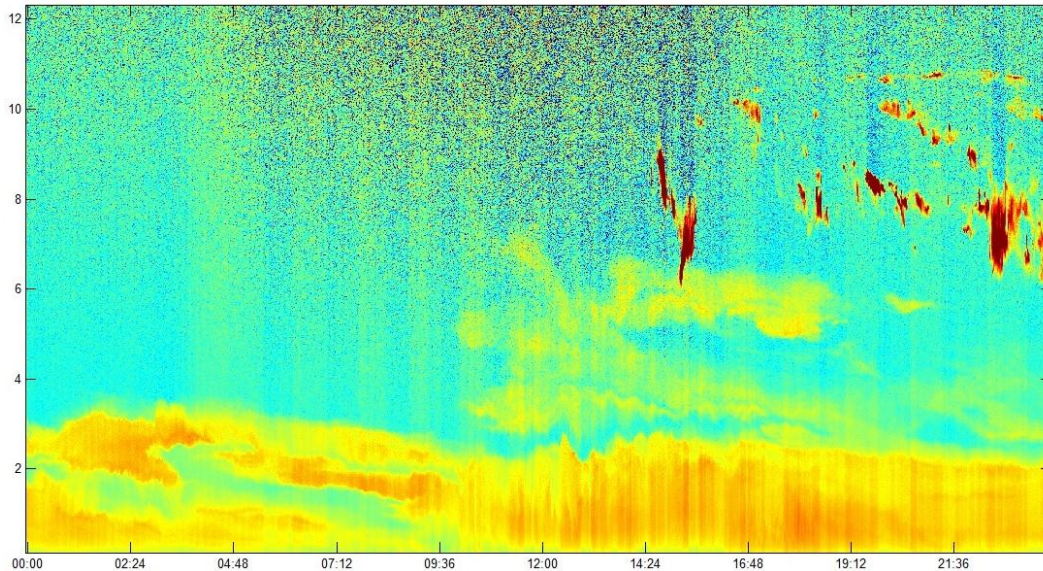


Výstup z modelu HYPSPPLIT (Obr. 5) poukazuje na pôvod vysokých koncentrácií prachu, zaznamenaných prostredníctvom lidarom, ktoré spôsobili vysoký spätný rozptyl vo výške okolo 2 km nad terénom v čase 18:00 UTC. Krivka spätnej trajektórie začína vo veľmi nízkych zemepisných šírkach, menej ako 20°, nad africkým štátom Mali. Prach bol zo zemského povrchu vyzdvihnutý s vysokou pravdepodobnosťou v mieste, kde krivka vytvára slučku (oblasť Alžírsko), a zároveň je tam aj veľmi blízko k povrchu.

Obrázok 5. Spätná trajektória pohybu vzduchu z výšky 2 km nad terénom v čase 18:00 UTC 4.4.2016, 150 hodín dozadu, NOAA HYPSPPLIT MODEL

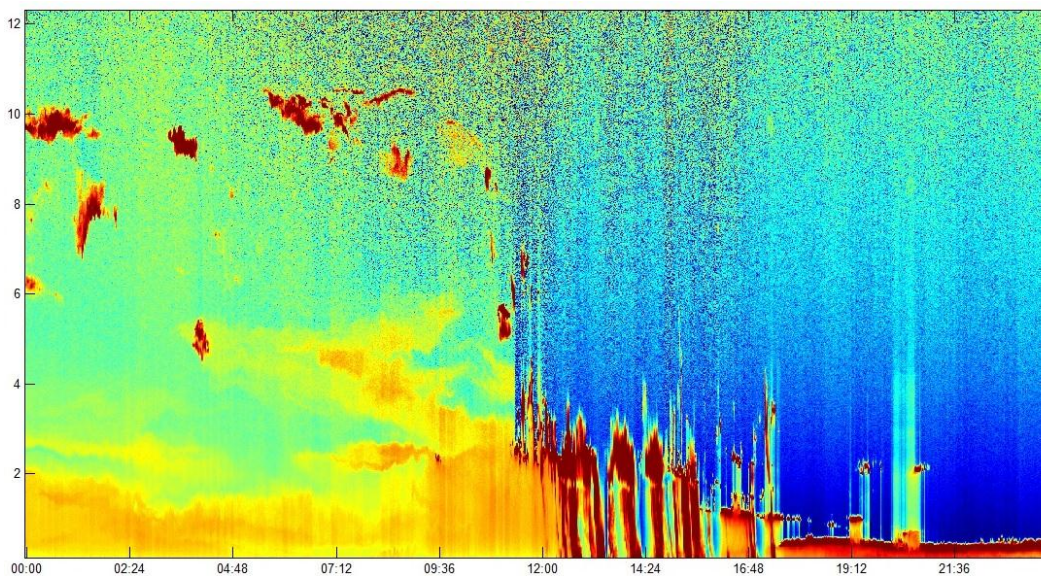
Tento okamih nastal približne o 06:00 UTC 1. apríla, to znamená, že prach k nám odtiaľ putoval asi tri a pol dňa. Vertikálne profily aerosólov nasledujúci deň, 5. apríla (Obr. 6), taktiež dokumentujú saharský prach. V tento deň vrstvy prachu vytvárali rovnako ako aj v predošlých dňoch rôzne štruktúry. Prevažne nižšie koncentrácie sme pozorovali vo voľnej atmosfére. Maximálna nadmorská výška, v ktorej sa prach zo Sahary vyskytoval, bola približne 8 km. To platí pre tento, ale aj pre dva

predchádzajúce dni. Prach nad našim územím vykazoval významnú dynamiku, ako to dokazuje aj výstup z lidar. Dochádzalo k jeho sedimentácii z väčších do menších výšok. V priebehu dňa, vďaka postupne rozvíjajúcej sa konvekcií, sa dobre rozptyľoval v celej hraničnej vrstve atmosféry. Relatívna vlhkosť vzduchu počas rádi sondážneho výstupu so začiatkom v čase 11:15 UTC dosiahla v celej troposfére maximálne 70 %, takže evidentne išlo o čisto pevný materiál (prach zo Sahary a iné lokálne aerosóly).

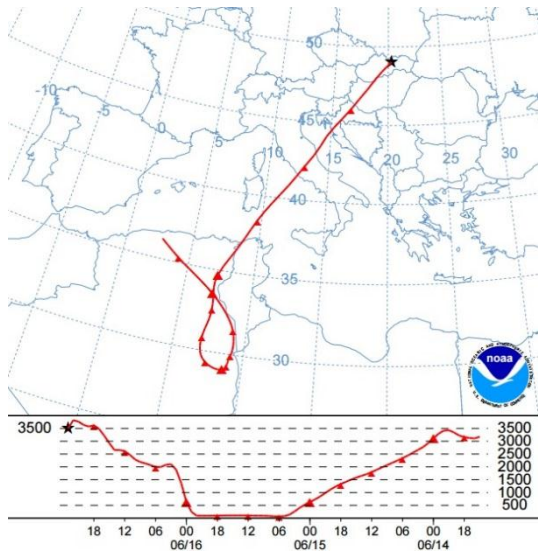


Obrázok 6. Vertikálny profil aerosólov dňa 5.4.2016 UTC

Nasledujúci deň, 6. apríla, sa už vyskytli atmosférické zrážky (Obr. 7). V noci a predpoludním ešte môžeme vidieť rôzne štruktúrované vrstvy aerosólov. Približne na poludnie došlo k zmene. Postupne sme pozorovali prehánky, počas ktorých dochádzalo k mokrej depozícii aerosólov (aj saharského prachu) nachádzajúcich sa v ovzduší. Zrážky prostredníctvom lidar detegujeme ako veľmi vysokú spätnú odrazivosť, ktorá začína v blízkosti zemského povrchu. Neskôr pred polnocou si ešte na obrázku môžeme všimnúť výskyt nízkej oblačnosti.



Obrázok 7. Vertikálny profil aerosólov dňa 6.4.2016 UTC



Púštny prach zo Sahary sa pomocou lidarů podarilo detegovať aj po výskyte zrážok. Stalo sa tak v nasledujúcich dvoch dňoch. Pôvod tohto prachu bol už ale z inej oblasti Sahary, v porovnaní s predchádzajúcimi dňami. Podľa modelu HYPSPPLIT leží zdroj týchto aerosólov viac východne, presnejšie v oblasti Líbye a Egypta.

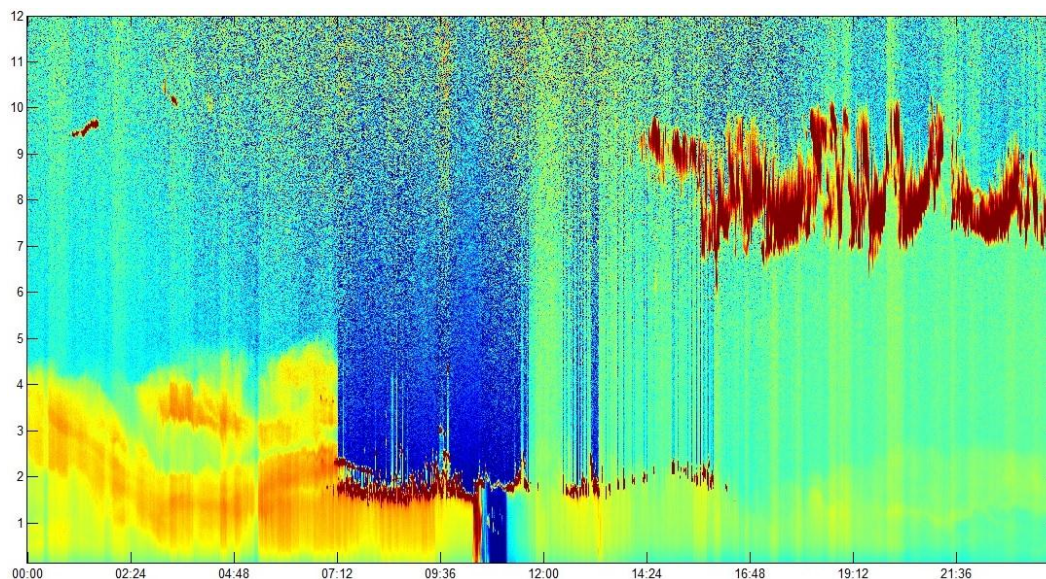
Tretie obdobie, počas ktorého bolo možné pozorovať saharický prach, sa vyskytlo v mesiaci jún. Synoptická situácia, ktorá to zapríčinila, bola podobná situáciám v mesiacoch február a apríl. Pre prúdenie tropického vzduchu z Afriky bola opäť kľúčová výrazná brázda nízkého tlaku vzduchu vo vyšších vrstvách atmosféry.

Po jej prednej strane k nám začal 16. júna prúdiť veľmi teplý tropický vzduch spoločne so saharickým prachom. Pôvod a trvanie prenosu aerosólových častíc jasne dokumentuje výstup z modelu HYPSPPLIT (Obr. 8).

Obrázok 8. Spätňá trajektória pohybu vzduchu z výšky 3,5 km nad terénom v čase 23:00 UTC 16.6.2016, 80 hodín dozadu, NOAA HYPSPPLIT MODEL

Môžeme vidieť, že v tomto prípade sa prach z Afriky až nad Slovensko dostal približne len za jeden deň. Prvé prachové častice zo Sahary boli lidarom zaznamenané približne o 21:00 UTC. Okolo polnoci sa vyššie koncentrácie prachu vyskytovali hlavne vo vrstve, ktorá sa nachádzala vo výške približne 3 km nad terénom (Obr. 9). Relatívna vlhkosť vzduchu v tejto výške dosahovala hodnoty okolo 75 %, preto môžeme povedať, že tu nebola zaznamenaná oblačnosť, ale išlo o saharický prach. Postupne došlo k poklesu výšky, v ktorej sa nachádzala daná vrstva prachu, a neskôr sa nad ňou objavila nová výrazná vrstva. Maximálna hrúbka prachu bola zaznamenaná medzi šiestou a siedmou hodinou. Prach v tento čas siahal od zemského povrchu až do výšky 5 km nad terénom, takže hrúbka vrstvy bola 5 km.

Pred jedenástou hodinou došlo k prechodu studeného frontu a tropická vzduchová hmota so saharickým prachom bola vystriedaná chladnejšou a čistejšou vzduchovou hmotou. Vhodná poveternostná situácia spôsobila, že trochu neskôr, v dňoch 20., 21. a 22. júna, sa nad naše územie opäť dostala tropická vzduchová hmota so saharickým prachom. V porovnaní so sedemnástym júnom bol však jeho výskyt v ovzduší menej výrazný.



Obrázok 9. Vertikálny profil aerosólov dňa 17.6.2016 UTC

4 Záver

Prvý polrok roku 2016 priniesol 3 epizódy výskytu saharského prachu nad územím Slovenskej republiky. Stalo sa tak v mesiacoch február (minimálne 3 dni), apríl (7 dní v rade) a jún (5 dní). Súhrne teda išlo o 15 dní v rámci jedného polroka, čo je pozoruhodný počet. Vo všetkých troch prípadoch sme jednotlivé štruktúry prachu detegovali pomocou meraní mikropulzného lidar, ktorými disponuje Aerologické a radiačné centrum SHMÚ v Gánovciach pri Poprade. Z pohľadu meraní lidar bola situácia zaujímavá hlavne v mesiacoch apríl a jún. Začiatkom apríla sme prach zo Sahary pozorovali v siedmich dňoch za sebou, počnúc 2. aprílom a končiac 8. aprílom. V tejto sedemdňovej sérii sme jeho výskyt zaznamenali v hraničnej vrstve atmosféry, ale aj vo voľnej atmosfére. Maximálna nadmorská výška, v ktorej sa vyskytoval, bola cca 8 kilometrov. Zaujímavá bola aj maximálna hrúbka vrstvy, v ktorej sa nachádzal, v určitom čase dňa 3. apríla dosiahla až okolo 5 kilometrov. Rovnakú maximálnu hrúbku dosiahla vrstva saharského prachu aj 17. júna počas tretej epizódy svojho výskytu.

5 PodĎakovanie

Autor ďakuje NOAA Air Resources Laboratory (ARL) za poskytnutie výstupov z modelu HYPSPPLIT prostredníctvom webstránky READY (<http://www.ready.noaa.gov>).

6 Literatúra

- [1] Ansmann, A., et al. (2003), Long-range transport to Saharan dust to northern Europe: The 11–16 October 2001 outbreak observed with EARLINET, *J. Geophys. Res.*, 108(D24), 4783.
- [2] Barkan, J., Kutiel, H., Alpert, P. and Kishcha, P. (2004), The synoptic of dust intrusion days from the African continent into the Atlantic Ocean, *J. Geophys. Res.*, 109, D08201.
- [3] Cimel – advanced monitoring (2011), Operation manual: Cloud and aerosol micro-lidar.
- [4] Engelstaedter, S., Tegen, I. and Washington, R. (2006), North African dust emission and transport, *Earth Sci. Rev.*, 79, 73–100.
- [5] Huneeus, N., Chevallier, F., Boucher, O. (2012), Estimating aerosol emissions by assimilating observed

- aerosol optical depth in a global aerosol model. *Atmos Chem Phys* 12: 4585–4606.
- [6] Huneus, N., Schulz, M., Balkanski, Y., Griesfeller, J., Prospero, J., et al. (2011), Global dust model intercomparison in AeroCom phase I. *Atmos Chem Phys* 11: 7781–7816.
- [7] Koren, I., Joseph, J. H. and Israelevich, P. L. (2003), Detection of dust plumes and their sources in northeastern Libya, *Can. J. Remote Sens.*, 29(6),792–796.
- [8] Papayannis, A., et al. (2008), Systematic lidar observations of Saharan dust over Europe in the frame of EARLINET (2000–2002), *J. Geophys. Res.*, 113, D10204.
- [9] Pappalardo, G., et al. (2010), EARLINET correlative measurements for CALIPSO: First intercomparison results, *J. Geophys. Res.*, 115, D00H19.
- [10] Pitari, G., Di Genova, G., Coppari, E., De Luca, N., Di Carlo, P., Iarlori, M. and Rizi, V. (2015), Desert dust transported over Europe: Lidar observations and model evaluation of the radiative impact. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, 2881–2898.
- [11] Rolph, G.D. (2016). Real-time Environmental Applications and Display sYstem (READY) Website (<http://www.ready.noaa.gov>). NOAA Air Resources Laboratory, College Park, MD.
- [12] Stein, A. F., Draxler, R. R, Rolph, G. D., Stunder, B. J. B., Cohen, M. D., and Ngan, F. (2015). NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 96, 2059-2077.
- [13] Yu, H., et al. (2015), The fertilizing role of African dust in the Amazon rainforest: A first multiyear assessment based on data from Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations, *Geophys. Res. Lett.*, 42.