



Review Paper

Impact of desert dust transport on fine particulate matter (PM₁₀) concentrations – methods for assessment and applicability for Bulgaria

Emilia Georgieva*, Hristina Kirova, Anastasiya Stoycheva

*National Institute of Meteorology and Hydrology,
Tsarigradsko shose 66, 1784 Sofia, Bulgaria*

Abstract: The aim of this work is to present some methodologies for estimating the contribution of desert dust to fine particulate matter concentrations. The focus is on methods used in Europe to subtract exceedances of limit values of PM₁₀ concentrations, measured at stations of regulatory networks for air quality. A brief overview of basic concepts of dust aerosol is given – physical and chemical characteristics, transport with air masses and measurement methods. Two procedures are commented, a standard one following the European Commission guidelines of 2011 and a revised one developed in Italy in 2017. Foreign experience of the application of the standard procedure for countries in Southern Europe and in the Mediterranean region is analyzed, as well as results of the application of the two procedures in Italy. Tmeteo.bghe main elements of the methodologies related to the identification of days with desert dust transport and to the quantification of the contribution of desert particles to daily mean concentrations of PM₁₀ are described in details. Some recent sources of information from model systems and remote sensing measurements are presented. The critical analysis provides guidance for the development of a procedure suitable for application in Bulgaria.

Keywords: desert dust, exceedances, PM₁₀, methods, Bulgaria

* Emilia.Georgieva@meteo.bg

Влияние на преноса на пустинен прах върху концентрациите на фини прахови частици – подходи за оценка и приложимост за България

Емилия Георгиева, Христина Кирова, Анастасия Стойчева

*Национален институт по метеорология и хидрология,
Цариградско шосе 66, 1784 София*

Резюме: Целта на настоящата работа е да представи някои методиките за оценка приноса на пустинен прах към концентрациите на фини прахови частици, които се използват в Европа за приспадане на превишения на норми за концентрации на ФПЧ₁₀, измерени в станции от регулаторни мрежи за качество на атмосферния въздух. Направен е кратък преглед на основни понятия за аерозоли с пустинен произход – физико-химически характеристики, пренос с въздушните маси и методи на измервания. Коментирани са две процедури – стандартна, следваща указанията на Европейската комисия от 2011 г., и ревизирана, разработена в Италия през 2017 г. Анализирани са чуждестранният опит от прилагането на стандартната процедура за страни в Южна Европа и в района на Средиземноморието, както и резултати от прилагане на двете процедури в Италия. Подробно са изложени основните елементи на методиките, свързани с идентификацията на дни с пренос на пустинен прах и с количествената оценка за приноса на пустинните частици към средноденоношните концентрации на ФПЧ₁₀. Представени са някои съвременни източници на информация от моделни системи и дистанционни измервания. Критичният анализ дава насоки за разработване на процедура, подходяща за използване в България.

Ключови думи: пустинен прах, превишения, ФПЧ₁₀, методи, България

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Всяка година стотици милиони тонове (1.2–1.8 Gt yr⁻¹ според Querol et al. (2019)) минерален прах от Северна Африка се пренасят с въздушните течения към Атлантическия океан или на север към Европа. Около 50 % от Сахарския прах достига до Европа (Goudie, 2014), като засяга в най-голяма степен страните от южната част на континента. Наличието на пустинен прах в атмосферата се свързва най-вече с намалена видимост, с оцветени валежи или червеникав оттенък на снежната покривка, както и с наслоен фин прах върху намиращи се на открито повърхности.

Влияние на преноса на пустинен прах върху концентрациите на фини прахови частици – подходи за оценка и приложимост за България

Минералните частици с пустинен произход оказват влияние на човешкото здраве и на редица социално икономически дейности (Middleton et al., 2019; Monteiro et al., 2022). Пустинният прах допринася за повишаване на концентрациите на фините прахови частици (ФПЧ) в приземния слой на атмосферата, като може доведе до значително влошаване на качеството на атмосферния въздух (КАВ) и да провокира или задълбочи хронични дихателни, кардиологични и други здравословни проблеми (Zhang et al., 2016; Querol et al., 2019). Преносът на пустинен прах е важен за авиацията, както заради намалена видимост, така и заради вероятността от повреди в двигателите (Nickovic et al., 2021). Производството на фотоволтаична енергия също може да бъде съществено повлияно, доколкото по-висока запрашеност на слънчевите панели води до спад в ефективността им (Costa et al., 2016). Отлагането на пустинен прах (сухо или посредством валежи) влияе върху земеделските култури, състоянието на екосистемите и биоразнообразието, включително и на морската среда (UNEP, 2020). Не на последно място трябва да се отбележи ролята на минералните аерозоли с пустинен произход върху времето и климата, като ефектите са от различно естество и засягат радиационния баланс на Земята, облакообразуването, оптичните свойства на атмосферата и др. (Schepanski, 2018).

Поради тези причини Световната метеорологична организация (СМО) определя пясъчните и прашни бури като природна опасност и стимулира изследванията и прогнозирането им в глобален аспект, като поддържа няколко регионални центъра с обхват на компетентност за различни географски региони. Основна цел на регионалните центрове е да предоставят своевременна и надеждна прогноза за преноса на пустинен прах, като се използват най-съвременни прогностични модели за динамиката и химичния състав на атмосферата, както и спътникова информация за съдържанието на аерозоли с различен произход. Регионалният център за Европа, Северна Африка и Близкия изток се намира в Барселона (WMO SDS-WAS Barcelona, <https://dust.aemet.es/>).

Представената работа се отнася само до един аспект от възможните ефекти на пустинните частици, а именно влиянието им върху концентрациите на ФПЧ. Интересът към тази тема в Европа е продиктуван както от изследователски задачи, свързани например с минералния и химичен състав на ФПЧ, така и от научно-приложни задачи, свързани с прилагане на Европейската директива за чистота на атмосферния въздух 2008/50/ЕО (AQD, 2008). Когато концентрациите на фините прахови частици с диаметър под 10 μm (ФПЧ₁₀) надвишават пределно допустимите норми поради принос, дължащ се на природни източници, тези превишения могат да се редуцират (AQD, 2008). Средноденонощната норма (СДН) за ФПЧ₁₀ е 50 $\mu\text{g}\text{m}^{-3}$ и не трябва да бъде надвишавана повече от 35 пъти в годината. Някои методи за определяне и приспадане на приноса на природни източници при превишения на тази норма са дадени в указанията на Европейската комисия от 2011 г. (ЕК, 2011).

В България превишенията на средноденоношните норми на ФПЧ₁₀ все още са проблем, особено в определени периоди на годината и за станциите в населените места. В последните 2-3 г. в НИМХ се работи по създаване на системен подход, с който да се оценява до каква степен тези превишения са повлияни и от преноса на пустинен прах.

Изготвянето и прилагането на методика за количествена оценка на този принос трябва да бъде съобразено с действащите към момента нормативни документи на европейско ниво, съвременни добри практики, както и със специфични особености за страната (условия на пренос, топография, станции за мониторинг и др.)

Целта на настоящата работа е да направи преглед и критичен анализ на използвани в Европа методи за оценка на приноса на пустинен прах към приземните концентрации на ФПЧ₁₀, като представи необходими елементи за изработване на методика, подходяща за прилагане в България.

2. ПУСТИНЕН АЕРОЗОЛ – ОСНОВНИ ПОНЯТИЯ

2.1. Размери и състав на аерозоли с пустинен произход

Пустинните частици имат минерален произход и се характеризират с асиметрична форма, различни размери, специфичен химически състав и оптични параметри. Характеристиките на аерозолите с пустинен произход определят и ефектите им върху климата, качеството на въздуха, човешкото здраве (Shepanski, 2018; Goudie, 2014; Querol et al., 2019).

Размерът на пустинните частици от Сахарски произход може да варира в широк диапазон, с аеродинамичен диаметър между 0.1 и 100 μm (Ryder et al., 2018). Най-големите частици обикновено се утаяват близо до източника, като в преноса на по-големи разстояния участват тези с диаметър под 20 μm , например при пренос над Атлантическия океан преобладават тези с размер между 5 и 20 μm (Middleton and Kang, 2017; Mahowald et al., 2014). За района на Западното Средиземноморие, самолетни измервания посочват типични размери на пренасяни във височина аерозолни частици в интервала 5-10 μm (Denjean et al., 2016). Подобни резултати показват, че пустинният аерозол ще има по-голямо влияние върху концентрациите на ФПЧ₁₀. Така например, при епизоди с пренос на пустинен прах в различни места от Южна Европа, са наблюдавани средночасови концентрации за ФПЧ₁₀ от 150 до 2500 μgm^{-3} , а за ФПЧ_{2.5} – от 43 до 86 μgm^{-3} (Goudie, 2014).

Физико-химическият състав на пустинните аерозоли зависи от района на тяхното емитиране, както и от промените, които претърпяват по време на преноса им в атмосферата. Най-често се съобщава за голямо разнообразие от глинести материали (кварц, калцит, фелдшпад и др.), силициеви, алуминиеви и железни оксиди, повишено съдържание на елементите Ti, Mn, Rb, V, Cr, Li и др. (Querol et al., 2019; Alastuey et al., 2016). В изследванията за оценка на приноса на

пустинен прах към концентрациите на ФПЧ, анализът за химико-физическото съдържание на събраните проби се използва като експериментално доказателство за наличие на пустинен прах. Съвместно с други методи (секция 3.1) той може да спомогне за идентифициране на произхода на пустинните аерозоли.

2.2. Атмосферен пренос на пустинен аерозол

Минерални частици от пустинните райони попадат в атмосферния въздух в условия на силни приземни ветрове, които способстват за отделянето им от земната повърхност и по-нататъшното им увеличаване в по-високите слоеве. Попаднали в атмосферата, пустинните частици могат да бъдат пренесени на големи разстояния и така да окажат влияние в райони, отдалечени от източниците.

Основните пътища на пренос на пустинни частици в глобален план (Querol et al., 2019) показват, че Балканският полуостров може да е повлиян от пустинен прах при пренос от югозапад, запад и изток.

Първостепенна роля има атмосферната динамика и синоптичната обстановка над големи територии от европейския континент и Северна Африка, които благоприятстват издигането на частици от пустинните райони и обуславят траекториите на обогатените с прах въздушните маси към различни части на Европа и Средиземноморието. Типизирането на синоптични ситуации, свързани с епизоди на пустинен прах (Varga et al., 2020; Francis et al., 2018; Gkikas et al., 2015) показва ролята на въздушните потоци във високите слоеве на атмосферата, положението на струйното течение и свързаните с него барични образувания.

За района на Източното Средиземноморие, включително и Балканите, преносът на Сахарски прах се свързва, най-общо, с циклон в Централното Средиземноморие, който се премества на изток, или с циклон над Централна Европа и антициклон над Източното Средиземноморие (Querol et al. 2009; Gkikas et al., 2015). Макар, че преносът на минерални частици от района на Северна Африка е преобладаващ, в определени ситуации пустинен аерозол от района на Азия повлиява концентрациите на ФПЧ в страните от северната част на Балканския полуостров и Централна Европа (Tositti et al., 2022; Mifka et al., 2023).

При изследвания доколко измерените ФПЧ концентрации са повлияни от пренос на пустинен прах е от значение анализът на траекториите на въздушните маси и възможни други източници на замърсяване (природни или антропогенни) по пътя им (Denjean et al., 2016). България е сравнително отдалечена от районите с емисия на пустинен прах като по време на преноса му с въздушните маси в продължение повече от няколко дни пустинните частици могат да се обогатят с други аерозоли от антропогенен или естествен произход (морски пръски, горски пожари). Според Querol et al. (2019) въздушните маси със Сахарски произход, преминавайки през Средиземноморието и прилежащите урбанизирани територии, могат да се обогатят с морска сол, сулфати, нитрати, въгледороди, органични замърсители и метали.

При оценка на влиянието на пустинен прах върху концентрациите на ФПЧ, които се измерват при земята, трябва да се отчита и друга особеност. Транспортът на пустинен прах основно е във височина и конкретните метеорологични условия определят наличието на турбулентност в граничния слой, посредством която частиците да слязат на по-ниски нива, или условия на температурни инверсии ще водят до задържане на преноса им в по-високите слоеве на атмосферата. Множество изследвания (например Gkikas et al., 2016) показват, че в Средиземноморието разпространението на Сахарски прах протича в няколко слоя, които в западната част са между 2 и 6 km, а в източната – от 0.5 до 6 km, със средна височина на пренос около 3 km.

Ефектът на пустинен прах върху приземните концентрации на ФПЧ е зависим и от сезона. През зимния период, когато приземните концентрации на ФПЧ са по-високи, дори и не много интензивен пренос може да доведе до превишения на средноденоношните норми.

В заключение, може да обобщим, че влиянието на преноса на пустинен прах върху концентрациите на ФПЧ в страната зависи от редица фактори – синоптична обстановка, произход на въздушните маси и райони през които преминават, натовареността им с прах, височината на която се транспортират аерозолните частици, наличието на валеж, а също от сезона и продължителността на реализация на епизодите. Преносът на пустинен прах има епизодичен характер, с продължителност на явлението от няколко часа до няколко дни. Поради това този природен източник има отношение най-вече към превишенията на средноденоношната норма (СДН) за ФПЧ₁₀ ($50 \mu\text{g m}^{-3}$), доколкото за ФПЧ_{2,5} такава норма не е определена (AQD, 2008).. Така, при всеки отделен епизод с пренос на пустинен прах, трябва да се оценява влиянието му върху СДН на ФПЧ₁₀.

2.3. Измервания

В стандартните мрежи за наблюдения на КАВ се измерват концентрации на ФПЧ, но не се правят анализи за състава им, които да докажат принос на пустинен прах. Изследването на минерални елементи в състава на ФПЧ позволява да се идентифицира наличие на пустинен прах. Този метод се счита за много надежден, и се използва при валидиране на методики за определяне превишенията на ФПЧ₁₀ свързани с принос от естествени аерозоли (Querol et al., 2009; Varnaba et al., 2017). Той обаче е скъп, изисква висока квалификация за интерпретиране на резултатите и е трудно приложим като част от стандартната процедура за измервания на ФПЧ₁₀. Обикновено се анализират проби от избрани станции и за ограничен период от време.

Дистанционни измервания на аерозоли в атмосферата от инструменти, разположени на земната повърхност или на спътници, също дават информация за наличие на пустинен аерозол. Подобни измервания се основават на оптичните и абсорбционни характеристики на аерозолите, като за пустинен аерозол се използват специално разработени комплексни алгоритми за интерпретация на

данните от различни източници. Подробно описание на наблюдателните мрежи и инструменти е дадено в обзора на Mona et al., 2023, продуктите са систематизирани в каталога на WMO SDS-WAS Barcelona (<https://dust.aemet.es/products/dust-products-catalogue>).

Наземните дистанционни измервания се осъществяват в рамките на международни мрежи. Европейската лидарна мрежа за изследване на аерозоли (EARLINET; www.earlinet.org) включва различен тип лидарни инструменти, които позволяват да се получи информация за разпределение на аерозолите във височина. Наземно разположени слънчеви фотометри на глобалната мрежа от AERONET (<https://aeronet.gsfc.nasa.gov>) измерват промените в слънчевата радиация в различни честоти на спектъра поради наличие на аерозоли от различно естество. Те предоставят данни за интегрална характеристика - общото съдържание на аерозоли в цялата колона атмосфера (AOD, или аерозолна оптична дебелина). И при двата вида измервания, за да се получат характеристики специално за пустинния аерозол, се прилагат сложни алгоритми за обработка на различни измерени параметри, които изискват експертен анализ.

Дистанционните измервания от сателитни инструменти са използвани от десетилетия за получаване на изображения, в по-ново време и за определяне на две интегрални аерозолни характеристики: AOD и AAI (абсорбиращ аерозолен индекс). AOD се отнася за общото количество аерозол в цялата атмосферна колона, без да се прави разлика между типа аерозоли, като за наличие за пустинен прах се съди по стойностите му за различни дължини на вълната. AAI е свързан с оптични дължини в ултравиолетовата част на спектъра (340-380 nm) и е чувствителен към абсорбиращи частици, като прах, дим, вулканична пепел. За разлика от AOD, той може да се получи и при наличие на облачност, когато аерозолите са над облака. Счита се, че AAI е добър индикатор за наличие на пустинен аерозол, най-вече във височина. В секция 4.2 е направен кратък обзор на съвременни сателитни данни за аерозоли.

3. ИЗПОЛЗВАНИ МЕТОДИ В ЕВРОПА

3.1. Указания на Европейската комисия от 2011 г. (стандартна процедура)

В указанията на Европейската комисия (ЕК, 2011) относно демонстриране и приспадане приноса на природни източници към превишенията на нормите за замърсители съгласно AQD, 2008 се определя кои източници могат да се считат за естествени и се дават насоки относно методите за количествено определяне на приноса на тези източници към превишения на нормите за определени замърсители. Преносът на природни частици от сухите региони (ре-суспендирани и пренесени с въздушните потоци пустинни частици) е посочен като един източник на замърсители от природен характер, доколкото тези частици не са свързани пряко или косвено с човешка дейност.

Предлаганата процедура се основава на научни разработки в Испания и Португалия, довели до изработване на методики за приспадане на превишения на СДН на ФПЧ₁₀, дължащи се на пренос на Сахарски прах в тези страни (Escudero et al., 2007).

Процедурата (наричана по-нататък стандартна) има два основни етапа: а) идентифициране на дните с пренос на пустинен прах, и б) количествено определяне на приноса му към превишенията на СДН на ФПЧ₁₀. Основните стъпки за всеки един етап ще бъдат изложени накратко по-долу.

3.1.1. Идентификация на периодите с пренос на пустинен прах

За идентифициране на епизодите със Сахарско нахлуване се препоръчват няколко стъпки с използване на множество продукти от различно естество – модели и наблюдения (наземни и дистанционни). Процесът включва ежедневно интерпретиране на метеорологичната ситуация, съвместно с анализ на обратни траектории с модела HYSPLIT (Stein et al., 2015; Rolph et al., 2017). Следващата стъпка е анализ на синоптичната обстановка, като се използват подходящи продукти, например тези на Европейския център за средносрочна прогноза на времето (ECMWF) (<https://www.ecmwf.int/>). В допълнение се инспектират сателитни изображения показващи преноса на въздушните маси, както и на карти показващи пространственото разпределение на ААІ, (по данни на инструмента ОМІ (спътник Аура на НАСА, <https://aura.gsfc.nasa.gov/omi.html>). Подобни карти не дават представа за наличието на пустинен прах при земята, поради което се включват и изброените по-долу елементи.

Прави се преглед на резултати от прогностични модели, отчитащи емисии и пренос на пустинен прах от Северна Африка към Европа. Посочени са три модела, разработвани в различни институции - SKIRON на Университета в Атина (Kallos et al., 1997), BSC - DREAM на Университета в Барселона (Nickovic et al., 2001; Perez et al., 2006,) и NAAPS на Военноморската изследователска лаборатория в САЩ (Zhang et al., 2008). Резултатите от моделите за концентрации на пустинен прах се интерпретират съвместно с анализ на полето на вятъра при земята и във височина, като тези полета се предоставят от оперативен модел за прогноза на времето.

Друг важен елемент е свързан с ежедневно проследяване на почасови концентрации на ФПЧ₁₀, измерени в станции от регулаторната мрежа за КАВ. Избират се само станции от типа „регионални фонові“. Бързото покачване в почасовите концентрации може да е индикатор за епизод със Сахарски пренос.

В заключение, първата стъпка на стандартната процедура е свързана с комплексен анализ на различен вид продукти, основани на моделни данни и измервания (дистанционни и наземни), като посочените източници са актуални към 2011 г.

3.1.2. Количествено определяне на приноса на пустинен прах към средноденонощните концентрации на ФПЧ₁₀

За количественото определяне на приноса на пустинен прах се прилага статистически подход с използване на времеви редици с измерени средноденонощни концентрации на ФПЧ₁₀ във всяка регионална фонова станция (РФС).

За всяка РФС и за всеки идентифициран ден се прави оценка на концентрацията на ФПЧ₁₀, която би се наблюдавала, ако нямаше пренос на пустинен прах. Това е така наречената „несмутена от пустинен прах регионална фонова концентрация“ за разглеждания ден и станция. Тази концентрация се определя като 40-ти процентил (PERC40) от стойностите на измерените концентрации на ФПЧ₁₀ за времеви интервал от 30 дни (15 дни преди и 15 дни след разглеждания ден), като не се броят дните с пустинен прах. Приносът на пустинен прах за дадения ден се определя като разлика между измерената концентрация на ФПЧ₁₀ и концентрацията, определена като несмутена от пустинен прах регионална фонова концентрация. Полученият принос на пустинен прах се прилага за приспадане на измерените средноденонощни концентрации за същия ден в други станции, разположени в район, за който РФС е представителна. След като измерените средноденонощни стойности на ФПЧ₁₀ се коригират за приноса на пустинен прах, получените концентрации се сравняват със СДН от 50 $\mu\text{g m}^{-3}$, и се проверява дали ако е имало превишение на СДН, след корекцията за пустинен прах такова няма.

Трябва да се отбележат две особености на стандартната процедура. Първата е, че тя се прилага само за регионални фонове станции, където концентрациите са повлияни минимално от антропогенна дейност. Втората особеност е определянето на параметрите за изчисление на несмутената регионална фонова концентрация – изборът на процентил и времевият интервал за изчислението му. Предложените пълзящо средно за PERC40 и времеви интервал от 30 дни се базират на изследвания по типизация на въздушни маси на Иберийския полуостров, както и по химичен състав на ФПЧ₁₀ в Испания. За други части от Европа, където няма потвърждение доколко тези параметри ще са валидни, се предлага да се използва 50-ти процентил (PERC50) пак в рамките на ± 15 дни без да се отчитат дните, идентифицирани с пренос на прах. PERC50 е по-консервативна характеристика, доколкото води до по-високи стойности за несмутената регионална фонова концентрация, а оттам и до по-ниски стойности за преноса на пустинен прах.

3.2. Резултати от прилагане на стандартната процедура

Прилагането на стандартната процедура в Испания и Португалия и валидирането ѝ на база данни за химически състав на ФПЧ₁₀ от фонове станции (Escudero et al, 2007), разкрива особености, които следва да се отчитат при интерпретация на резултатите за приноса на пустинен прах. Те се изложени накратко по-долу.

Регионалните фонове станции могат да са разположени на по-големи надморски височини отколкото наблизко разположени градски станции. Преносът на Сахарски пясък за Иберийския полуостров е минимум на около 1500 м височина, и е необходимо време докато тези частици достигнат и по-ниските слоеве. Така, ФПЧ₁₀ измерени на РФС, която е разположена на по-голяма надморска височина може да са повлияни от пустинен прах, а тези в по-ниските места – не. В такъв случай не е оправдано да се прилага корекция за принос на пустинен прах в по-ниско разположените станции, макар и да се намират на малки разстояния от РФС.

Съществуват обстановки, при които анализът на обратните траектории указва, че епизодът с нахлуване на Сахарски въздушни маси е отминал, но в атмосферата все още има аерозоли с пустинен характер, като времето им на живот преди да се отложат при земята е около 2-3 дни. Това предполага, че може да няма индикации за Сахарски пренос на РФС и нахлуването да е отминало, но при земята концентрациите на ФПЧ₁₀ може да са повишени заради пустинен прах.

Процедурата за оценка на приноса се отнася до средноденоношни концентрации, но е показано, че и средногодишната норма на ФПЧ₁₀ (40 $\mu\text{g m}^{-3}$) може да бъде повлияна в страните на Иберийския полуостров. Затова се препоръчва да се прави оценка и за годишния принос на пустинен прах за отделните станции.

В Гърция процедурата е приложена за станции в района на Атина с измервания за десет годишен период (Aleksandropoulou and Lazaridis, 2013). Двата етапа на процедурата са спазени, но някои от техните елементи са модифицирани. Например, при идентификацията са анализирани тези дни, в които всички станции имат пик в измерените концентрации на ФПЧ₁₀. В допълнение са използвани обратни траектории от два различни модела, като се отчита период от пет дни и височини до 5000 m, както и информация от ре-анализ за потвърждаване на синоптичната обстановка с пренос на Сахарски прах. Нов елемент е определянето и на дните с големи горски пожари (> 50 ha), които могат да съвпадат с тези на Сахарски пренос. За определяне на количествения принос е използвана само една станция (крайградски тип), която е определена за представителна за изследвания район. Оценката за пустинния принос в тази станция е използван за редуциране на наблюдаваните концентрации в останалите станции. Направени са изводи, че при прилагане на стандартната процедура в райони, където регионалните фонове станции са недостатъчни на брой, са препоръчителни допълнителни анализи за отчитане и на принос от антропогенни източници при превишенията в градски станции.

За страните от Средиземноморието стандартната процедура е приложена за многогодишни периоди (Querol et al, 2009; Pey et al., 2013) и данни предимно от РФС, като от България е включена станция Рожан от мрежата на Изпълнителната агенция по околна среда (ИАОС) за КАВ.

За РФС Рожан приносът на пустинен прах към многогодишната (2005-2010 г.) средна стойност на ФПЧ₁₀ е оценен на 1.7 $\mu\text{g m}^{-3}$ и е в съответствие с този за други

две високопланински станции в Италия и Испания (Peu et al., 2013). Концентрацията на пустинен прах в Рожен представлява 15% от многогодишната средна концентрация на ФПЧ₁₀. Честотата на Сахарските нахлувания е оценена на 21% на годишна база. Сезонното разпределение на дните с пустинен прах за Рожен показва по-голяма честота на Сахарски пренос през месеците април, юли и август.

3.3. Ревизирана процедура използвана в Италия

Ревизирана методика е предложена в Италия (Barnaba et al., 2017). Необходимостта от ревизия на стандартната процедура по (ЕК, 2011) се обосновава с обстоен анализ на нейното прилагане в Италия, където има малък брой РФС, както и на база резултати от специфични измервания за атмосферен аерозол (лидарни и за химически състав на ФПЧ) (Struckmeier et al., 2016).

Ревизираната процедура запазва основни предимства на стандартната, именно: а) съдържа два етапа – за идентификация на дни с пренос и за количествено определяне на концентрациите на пустинен прах, и б) дава възможност за оценка на приноса на пустинен прах за всяка една станция с измервания на ФПЧ₁₀.

Новите елементи са два: опростена процедура за идентифициране на дни с пренос на пустинен прах и променени параметри за количествена оценка на приноса на прах към средноденонощни концентрации на ФПЧ₁₀.

За идентификация на дните с пренос на пустинен прах в ревизираната процедура се използват единствено моделни резултати от BSC-DREAM8b (Basart et al, 2012). За всяка станция се разглеждат средноденонощните концентрации на пустинен прах при земята, и когато те са над прагова стойност ($5 \mu\text{gm}^{-3}$) денят се маркира като повлиян от Сахарски пренос. Този подход позволява да се избегне трудоемкия метод на стандартната процедура за етапа на идентификация, а също така е приложим за всяка станция.

За количествено определяне на приноса на пустинен прах се запазва статистическият подход с обработка на времеви редици от средноденонощни концентрации на ФПЧ₁₀. Предлага се промяна, свързана с прилагането му за всяка станция, като се използва „само-калибриращ“ подход за определяне на фоновата концентрация за станцията. Тази концентрация се изчислява като PERC50 във времеви интервал от ± 3 дни без да се отчитат дните с пренос на прах. Приносът на Сахарски прах към концентрациите на ФПЧ₁₀ за даден ден се определя от разликата между измерената концентрация на този ден и PERC50. Значително по-късият времеви прозорец спрямо този в стандартната процедура (± 15 дни) е предложен въз основа на допълнителни анализи на измерени концентрации на ФПЧ в страната.

Сравнение между резултати от стандартната и ревизираната процедура за 37 станции в Италия за период от три години (2012-2014) (Barnaba et al., 2017) показва, че ревизираната процедура дава по-голям брой идентифицирани дни с

пренос на прах и съответно повече превишения поради пустинен аерозол. За валидиране на двете процедури са използвани специфични аерозолни измервания при полеви кампании, целта на които е била да се определят оптични, физични и химични характеристики на пустинен прах (Struckmeier et al., 2016; Rizza et al., 2017). Ревизираната процедура е показала по-добри резултати, както по отношение на настъпване на явлението, така и за оценения принос.

3.4. Критичен анализ на използваните методи за оценка на приноса на пустинен прах върху концентрациите на ФПЧ₁₀

Изложените в 3.1-3.3 методи са разработвани и прилагани с цел по-добро разбиране на причините водещи до превишения на нормите съгласно AQD (2008) за концентрации на ФПЧ, измервани в национални мрежи за КАВ. Използването на създадените методи е пряко свързано с възможността за редукция на превишенията на СДН за ФПЧ₁₀ при годишните докладвания на страните членки на ЕС към Европейската агенция за околна среда. Това определя и основните параметри на създадените подходи – анализ на времеви редици от измерени концентрации на ФПЧ за една календарна година и идентификация на дни с пренос на пустинен прах за всяка станция от националните мрежи за КАВ.

Стандартната процедура (ЕК, 2011) се основава на използване само на регионални фонове станции, както за идентификация на дните с пренос на пустинен прах, така и за количествена оценка на приноса му. Това ограничава прилагането на процедурата когато РФС са малко на брой и когато те не са представителни за други станции. Сахарските нахлувания се характеризират с бързо изменяща се картина на пространствено разпределение, като за кратко време могат да бъдат засегнати само части от дадена страна и в рамките на ден или няколко дни, с еволюцията на процесите на пренос и депозиция, пращната въздушна маса да обхване или по-големи площи, или да напусне територията на страната. Гъста мрежа от РФС би помогнала да се отчете пространствената нехомогенност. Стандартната процедура е предложена по данни от Иберийския полуостров, където има над 20 регионални станции, но в други страни тези станции са много по-малко на брой. Друг проблем, освен броят на РФС, е и тяхната представителност за друг тип станции, тъй като приносът на пустинен прах се определя количествено по данни от РФС и след това се прилага за други станции от зоната на нейната представителност. Макар и на близко разстояние до други станции, дадена РФС може да не е представителна за тях по отношение на пустинен прах. Причината е в особеностите на преноса на пустинния аерозол, който обхваща значителен слой от атмосферата. Така, регионална станция, разположена в планински район, би могла да бъде повлияна в по-голяма степен от прашни частици, отколкото станция разположена наблизо, но в равнинен терен. В зависимост от синоптичните или крупномасштабните процеси и локалните метеорологични условия могат да минат няколко дни преди прашните частици

Влияние на преноса на пустинен прах върху концентрациите на фини прахови частици – подходи за оценка и приложимост за България

налични във височина да бъдат размесени и да окажат влияние и на приземните концентрации на ФПЧ.

Стандартната процедура е доста трудоемка в етапа на идентификация на дните с пренос на прах, защото предполага експертен анализ на голям брой различни по тип продукти от модели и измервания. За количественото определяне на приноса на пустинен прах, стандартната процедура предлага статистически подход с обработка на времеви редици от наблюдавани средноденонощни концентрации на ФПЧ₁₀, като се използва процентил (PERC40) за всеки ден идентифициран с пренос на прах, определен за период от 30 дни. Статистическият индикатор и начинът му на изчисляване оказват влияние при оценката на приноса на пустинен прах, доколкото той се определя като разлика между наблюдаваната концентрация на ФПЧ₁₀ и изчислената фоновая концентрация за всеки идентифициран ден. Ако тази фоновая концентрация е подценена, то описаната процедура ще доведе до надценяване на приноса на пустинен прах към концентрациите на ФПЧ₁₀.

Ревизираната процедура (Barnaba et al., 2017) е приложима за всички станции от регулаторните мрежи с измервания на ФПЧ₁₀. Съществен положителен елемент е използването само на моделни резултати за средноденонощни концентрации на приземен пустинен прах в етапа на идентификация. Това несъмнено е подход, който изключва субективния фактор и позволява анализите да са за всяка станция. Критичен елемент е предложената прагова стойност за моделираната средноденонощна концентрация на пустинен прах ($5 \mu\text{gm}^{-3}$), на база на която един ден се идентифицира като такъв в който няма/има пренос на пустинен прах, а следователно и като ден в който потенциално може да са редуцират наблюдавани превишения на СДН на ФПЧ₁₀. Авторите на ревизираната процедура посочват, че тази прагова стойност може да се окаже валидна за други страни с подобна на Италия географска ширина. Най-вероятно обаче са необходими допълнителни анализи за чувствителност на резултатите както към праговата стойност, така и към модела и неговата пространствена резолюция. Ревизираната процедура запазва подхода за количествено определяне на приноса на пустинен прах чрез статистически индикатор на база измерени концентрации, но предлага това да се прилага за всяка станция, и то с променени параметри: PERC50 и времеви интервал от ± 3 дни.

И двете процедури (стандартна и ревизирана) имат критични параметри свързани с прилагането им в дадена страна. Оптималният избор на тези параметри се обуславя от допълнителни анализи в няколко посоки: типични условия на пренос на пустинен прах; представителност на станциите, измерващи фини прахови частици; организиране на специфични измервания свързани с пренос и характеристики на пустинен аерозол (лидарни измервания, физико-химически състав на ФПЧ).

4. СЪВРЕМЕННИ ИЗТОЧНИЦИ НА ИНФОРМАЦИЯ ЗА ИДЕНТИФИЦИРАНЕ НА ПРЕНОСА НА ПРАХ

Указанията на ЕК (2011) и съответната стандартна процедура посочват използване на редица източници на информация за пустинен аерозол, които в днешно време са загубили актуалност. През последното десетилетие, в резултат на интензивни изследвания свързани с моделиране на атмосферната динамика и преноса на замърсители, също и с напредъка в дистанционните измервания, бяха създадени продукти, които биха могли да се използват. Тук се изброяват само някои от тях, които са свободно достъпни и са резултат от усилията на големи научни колективи и международни инициативи.

4.1. Модели за пренос на пустинен прах

4.1.1. Модели на WMO SDS-WAS - Барселона

Регионалният център на СМО създава и разпространява различни продукти за пустинен прах за района на С. Африка, Близкия Изток и Европа (<https://dust.aemet.es>)

На база моделни резултати се изготвят карти с прогнози за следващите 72 часа на приземна концентрация на пустинен прах и параметъра DAOD (интегрална характеристика за съдържание на прах в цялата колона атмосфера). Прогнозите са от 16 индивидуални модела за атмосферно замърсяване в глобален и регионален мащаб, които имат модули за параметризиране на източници, транспорт и отлагане на пустинен аерозол. Част от тези модели асимилират и спътникови данни за съдържанието на аерозол в атмосферата. За минимизиране несигурността на отделните модели се предоставят резултати и от „мулти-модел“, който конструира медианата от стойностите на индивидуалните модели (Terradellas et al., 2020). Мулти-моделът има пространствена резолюция от 0.5° x 0.5°. Освен визуализиране на прогнозите по избор от мулти-модела или от индивидуални модели, се предоставя възможност за сравнение на карти от различни модели, както и сравнение със спътникови данни за съдържане на аерозоли в атмосферата.

4.1.2. Модели на Програма Коперник – Услуги за мониторинг на атмосферата (CAMS)

Карти с прогнози на атмосферни замърсители, включително и параметри за пустинен прах, могат да се намерят на <https://atmosphere.copernicus.eu>. Прогнозите са почасови за 4-5 дни напред, като освен в графичен вид, данните от моделите са свободно достъпни, с архив за последните няколко години.

Ще отбележим следните модели/продукти, които представляват интерес относно преноса на пустинен прах.

Влияние на преноса на пустинен прах върху концентрациите на фини прахови частици – подходи за оценка и приложимост за България

Глобалният модел за състав на атмосферата (CAM5-ECMWF) отчита атмосферната динамика, източниците, химическите трансформации и отлаганията на над 50 замърсители и 7 различна вида аерозоли (включително и такива с пустинен произход), (Benedetti et al., 2009). Характерна особеност е, че тази глобална система усвоява сателитни данни за аерозоли и газове, като използва най-висок клас алгоритми за асимилиране на данни. Хоризонталната резолюция на модела е $0.4^\circ \times 0.4^\circ$ (около 40×40 km). Прогнозите са налични за 5 денонощия напред. Има множество различни параметри, свързани с пустинен аерозол и негови характеристики (оптични свойства, съотношение на смесване, депозиция и др.). Налични са и данни от ре-анализ EAC4 (ретроспективни пресмятания с асимилиране на данни от наблюдения) (Inness et al., 2019) за периода 2003 -2022 г. За целите на идентификация на преноса на пустинен прах най-съществен е параметърът DAOD (Dust aerosol optical depth at 550 nm). Този индекс, наричан още оптична дебелина за пустинен прах, дава информация за наличното съдържание на пустинен аерозол в цялата колона атмосфера на дадено място.

Регионалният модел на CAM5 за прогноза качеството на въздуха в Европа е от типа ансамбъл (CAM5-ENS) (Marecal et al., 2015). Той комбинира резултатите на 11 добре известни химически транспортни модела, развивани и използвани от научни институции в Европа. Всички индивидуални модели се захранват с еднакви входни данни за метеорология, емисии и гранични условия. Много от тях имат опция за асимилиране на данни от наблюдения. CAM5-ENS изчислява полета на редица замърсители, включително ФПЧ₁₀, ФПЧ_{2.5}, и пустинен прах във ФПЧ₁₀. Хоризонталната стъпка е $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ (около 10 km), прогнозите са за следващите 96 часа, архивът с моделни резултати е за последните 3 години. Налични са и данни от ре-анализ, при който се асимилират данни от станциите, включени в система на Европейската агенция за околна среда. За идентификация на пренос на пустинен прах могат да се използват моделни резултати при земята и във височина.

CAM5 предлага и полезна ежедневна информация за пустинен прах за основни градове в Европа – прогноза за химическия състав на ФПЧ₁₀ (включително пустинен прах) (<https://policy.atmosphere.copernicus.eu/>). За България продуктите са налични само за София, но предвид хоризонталната стъпка на използваните модели и подходи, показаните параметри трябва да се интерпретират за район от около 30 km.

4.2. Спътникова информация за аерозоли в атмосферата

За целите на идентификация на пренос на пустинен прах в Европа, ще отбележим накратко някои съвременни и широко достъпни продукти, базирани на инструменти на сателити на EUMETSAT (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites), ESA (European Space Agency), NASA

Емилия Георгиева, Христина Кирова, Анастасия Стойчева

(National Aeronautics and Space Administration). Продуктите могат да се класифицират най-общо като изображения в почти реално време (и архив от такива изображения), данни от специфични алгоритми за обработка на спътникова информация както и карти с вече обработени данни за AAI/AOD.

4.2.1. Продукти на EUMETSAT

Изображения за типа на въздушната маса от инструмента SEVIRI на спътника MSG на EUMETSAT във вариантите „natural RGB“ (през деня) и “dust RGB” (през деня и през нощта) дават индикация и за наличие на аерозоли, (<https://view.eumetsat.int/>). Първият вариант на изображения е по-подходящ за райони над море, а вторият – над сушата. Изображенията са налични в почти реално време, на времеви интервал от 15 мин, с пространствена резолюция 3 km. Основен недостатък е, че интерпретацията им не е тривиална заради наслагване на цветове, освен това те не дават информация за количеството прах или за височината на която се намира, а тънки слоеве от прах или прах на ниски височини е трудно да бъдат открити. Поради това се препоръчва да бъдат интерпретирани съвместно и с други продукти.

Изображения за AAI, конструирани на база дневни данни от няколко сензора на сателити на ESA се обработват, валидират и разпространяват и като част от програмата за сателитни приложения за мониторинг на химическия състав на атмосферата (EUMETSAT AC SAF) (<https://www.temis.nl/acsaf/>). От няколко години се предлага и комбиниран продукт за аерозоли (PMAP) който обобщава глобални данни от различни инструмента на сателитите MetOp на ESA. Освен AOD, този продукт дава и класа аерозол с разграничаване на пустинен, вулканичен, морски, от биомаса (Grzegorski et al., 2022). В цифров вид продуктите са достъпни на портала за данни (<https://user.eumetsat.int/data-access/data-centre>).

4.2.2. Продукти на NASA

Изображенията, свързани с аерозоли в атмосферата, се предоставят на дневна база, в почти реално време (<https://worldview.earthdata.nasa.gov>). Има възможност за комбинирани изображения с данните от няколко спътника и инструмента. Те са за параметрите: AOD от инструмента MODIS (Terra&Aqua сателити); MAIAC AOD – същия параметър, но с подобрен алгоритъм и по-голяма резолюция над сушата (1 km); AOD от инструмента VIIRS (SNPP сателит); AAI на инструмента OMI (Aura сателит); AAI на инструмента OMPS (SNPP сателит). Комбинираните изображения позволяват да се допълват взаимно данни от различни инструменти, които имат различна пространствена резолюция. Наличието на плътна облачност е критичен елемент за тези изображения, а интерпретацията им изисква практика и проследяване и на друга синоптична информация. Данните могат да се намерят на <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>.

4.2.3. Продукти на ESA

Няколко вида инструмента и сателити предоставят информация за аерозоли в атмосферата. GOME-2 (сателити MetOp A,B,C) – оптичен спектрометър, който работи в ултравиолетовата и видимата част на спектъра, и IASI (MetOp A, B) – интерферометър, работещ в инфрачервената част на спектъра, предоставят данни за ААІ. Най-новият инструмент, в работен режим от 2018 г. е TROPOMI (Sentinel-5p), който работи в три спектрални ивици и дава данни за аерозолен индекс и за височината на аерозолния слой с хоризонтална разделителна способност (7x3.5 km). Карти за ААІ конструирани по данни от изброените инструменти в почти реално време са достъпни от <https://sacs.aeronomie.be/nrt/index.php>

Повече информация за моделни и сателитни източници на данни относно пустинен аерозол може да се намери в каталога с продукти, поддържан от Регионалния Център на СМО в Барселона.

5. ЗАКЛЮЧИТЕЛНИ БЕЛЕЖКИ – МЕТОДИ ПОДХОДЯЩИ ЗА БЪЛГАРИЯ

Многобройни изследвания в последните десетилетия, проведени в различни части на света, демонстрират връзката между аерозоли с пустинен произход и концентрациите на фини прахови частици, чиято приземна концентрация е тясно свързана с качеството на атмосферния въздух и човешкото здраве.

Прогнозата за пренос на въздушни маси, съдържащи пустинен аерозол, към страната без съмнение е добра основа за информираност на експерти по КАВ. НИМХ изготвя такива прогнози за целите на МОСВ, които се използват в техните ежедневни бюлетини (<https://www.moew.government.bg/bg/presentur/byuletini-na-mosv/>). Обобщена информация за пренос на пустинен прах може да се намери в месечните бюлетини на НИМХ (<https://bulletins.cfd.meteo.bg/>). Прогнозите се изготвят след експертен анализ от дежурните синоптици, който включва комбиниран анализ на синоптична ситуация, сателитни изображения, резултати от съвременни числени метеорологични модели, модели за преноса и химическите трансформации на аерозоли с пустинен произход, както и на редица други замърсители. В голяма степен процесът следва многобройни елементи посочени за идентификация на преноса на пустинен прах (ЕК, 2011).

Използването на прогнозите не е достатъчно за определяне на количествения принос на пустинния прах към превишения на норми за ФПЧ. Оценката на този принос е елемент от годишното докладване за качество на въздуха от страните членки към Европейската агенция за околна среда. Редуцирането на превишения на ФПЧ₁₀, които се дължат на природни източници, дава възможност да се избегнат наказателни процедури спрямо страната, когато тези превишения са над нормативно установените в директивата за качество на въздуха.

Накратко ще отбележим подходящите елементи на една методика за оценка на влиянието на аерозоли с пустинен произход за превишенията на норми за концентрации на ФПЧ_{10} , измерени във всеки тип станция в страната.

5.1. Относно идентификацията на дни с пренос на пустинен прах

Използването на резултати от модели, които отчитат емисии и пренос на частици с пустинен произход, има редица предимства пред експертен анализ на множество други продукти от разнороден характер (например синоптични карти и спътникови снимки), когато се цели прилагане на методиката от не тесни специалисти по атмосферно динамика. Моделните резултати дават възможност за всяка станция да се прецени дали за даден ден има влияние на пустинен прах. Тъй като преносът на пустинен прах се характеризира с голяма пространствено-времева изменчивост, препоръчително е тези модели да имат висока хоризонтална и времева резолюция. Оценките са необходими за календарна година, което изисква моделните резултати да са налични за изминал период. Критичен елемент при интерпретацията на моделните резултати е изборът на прагова стойност за средноденонощни концентрации на приземните концентрации на пустинен прах, определен за всяка станция. От този избор зависи дали въобще даден ден ще бъде отбелязан в отделните станции като повлиян от пренос на прах, а от там и за по-нататъшна оценка на приноса. Въпреки че използването на резултати от модели значително намалява субективния фактор, трябва да се отчете, че моделните резултати са натоварени и с грешки. Затова е препоръчително да се избере модел/модели, за които има процедури на валидиране на регулярна база.

5.2. Относно количествената оценка на приноса на пустинен прах

Двете процедури (стандартната и ревизирана) използват статистически подход и анализ на времеви редици от средноденонощни концентрации на ФПЧ_{10} измерени в станции от регулаторни мрежи за КАВ.

Стандартната процедура изисква това да се прави само за регионални фонове станции, където няма влияние на антропогенни замърсители. Тя има ограничено приложение за страната ни, тъй като само две от станциите на ИАОС са от този тип, разположени в планински райони – на Копитото и на Рожен. Предимство е, че и двете места са в южната част на страната, която често е най-засегнатата от Сахарските нахлувания. Но отдалечеността им от редица градски станции силно затруднява автоматичното прехвърляне на определения за тези станции принос към останалите станции в страната. По-подходяща е ревизираната процедура, където количественият принос се оценява за всяка станция, независимо от нейния тип.

Ключов елемент и на двете методики е определянето на „фоновата“ концентрация (т.е. тази неповлияна от преноса на прах за дадения ден). Тази

концентрация се изразява чрез статистически индикатор с използване на времевите редици от наблюдавани средноденонощни концентрации на ФПЧ₁₀. Статистическият индикатор е процентил (PERC40, PERC50), който се изчислява за определен времеви интервал. Двете процедури използват различен времеви интервал (30 и 6 дни), като изборът му зависи от допълнителни метеорологични и статистически анализи.

В България до момента няма разработки за тестване на методи, макар и за кратки периоди от време (няколко месеца, или една година). Това предполага, че едва в процеса на прилагане на някои подходи и алгоритми могат да се идентифицират тези, които са най - удачни за една оперативна методика.

REFERENCES

- AQD (2008), Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/50/oj>
- Alastuey, A., Querol, X., Aas, W., Lucarelli, F., Pérez, N., Moreno, T., Cavalli, F., Areskoug, H., Balan, V., Catrambone, M., Ceburnis, D., Cerro, J. C., Conil, S., Gevorgyan, L., Hueglin, C., Imre, K., Jaffrezo, J.-L., Leeson, S. R., Mihalopoulos, N., Mitosinkova, M., O'Dowd, C. D., Pey, J., Putaud, J.-P., Riffault, V., Ripoll, A., Sciare, J., Sellegri, K., Spindler, G., Yttri, K. E. (2016), Geochemistry of PM₁₀ over Europe during the EMEP intensive measurement periods in summer 2012 and winter 2013, *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 6107–6129, <https://doi.org/10.5194/acp-16-6107-2016>
- Aleksandropoulou V., Lazaridis M. (2013), Identification of the Influence of African Dust on PM₁₀ Concentrations at the Athens Air Quality Monitoring Network during the Period 2001–2010, *Aerosol and Air Quality Research*, 13, 1492–1503
- Barnaba, F., Bolignano, A., Di Liberto, L., Morelli, M., Lucarelli, F., Nava, S., Perrino, C., Canepari, S., Basart, S., Costabile, F., Dionisi, D. (2017), Desert dust contribution to PM₁₀ loads in Italy: methods and recommendations addressing the relevant European Commission Guidelines in support to the Air Quality Directive 2008/50, *Atmos. Environ.*, 161, 288–305. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.04.038>
- Basart, S., Perez, C., Nickovic, S., Cuevas, E., Baldasano, J.M. (2012), Development and evaluation of the BSC-DREAM8b dust regional model over Northern Africa, the Mediterranean and the Middle East, *Tellus B*, 64, 18539
- Benedetti, A., Morcrette, J. J., Boucher, O., Dethof, A., Engelen, R., Fisher, M., Flentje, H., Huneeus, N., Jones, L., Kaiser, J. (2009), Aerosol analysis and forecast in the European centre for medium-range weather forecasts integrated forecast system: 2. Data assimilation, *J. Geophys. Res.*, 114, D13205, <https://doi.org/10.1029/2008JD011115>
- Costa, S., Diniz, A. S., Kazmerski, L. L. (2016), Dust and soiling issues and impacts relating to solar energy systems: Literature review update for 2012–2015, *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 63, 33–61, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.059>
- Denjean, C., Cassola, F., Mazzino, A., Triquet, S., Chevaillier, S., Grand, N., Bourriane, T., Momboisse, G., Sellegri, K., Schwarzenbock, A., Frenay, E., Mallet, M., Formenti, P. (2016), Size distribution and optical properties of mineral dust aerosols transported in the western

- Mediterranean, Atmos. Chem. Phys., 16, 1081–1104, <https://doi.org/10.5194/acp-16-1081-2016>
- EK (2011), Establishing Guidelines for Demonstration and Subtraction of Exceedances Attributable to Natural Sources under the Directive 2008/50/EC on Ambient Air Quality and Cleaner Air for Europe.
https://ec.europa.eu/environment/air/quality/legislation/pdf/sec_2011_0208.pdf
- Escudero, M., Querol, X., Pey, J., Alastuey, A., Perez, N., Ferreira, F., Alonso, S., Rodríguez, S., Cuevas, E. (2007), A methodology for the quantification of the net African dust load in air quality monitoring networks, Atmos. Environ., 41, 5516–5524, <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.04.047>
- Francis, D., Eayrs, C., Chaboureaud, J.-P., Mote, T., Holland, D. M. (2018), Polar jet associated circulation triggered a Saharan cyclone and derived the poleward transport of the African dust generated by the cyclone, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 123, 11,899–11,917, <https://doi.org/10.1029/2018JD029095>
- Gkikas, A., Houssos, E.E., Lolis, C.J., Bartzokas, A., Mihalopoulos, N., Hatzianastassiou, N., (2015), Atmospheric circulation evolution related to desert-dust episodes over the Mediterranean, Q. J. R. Meteorol. Soc., 141, 1634–1645, <https://doi.org/10.1002/qj>
- Gkikas, A., Basart, S., Hatzianastassiou, N., Marinou, E., Amiridis, V., Kazadzis, S., Pey, J., Querol, X., Jorba, O., Gassó, S., Baldasano, J. M. (2016), Mediterranean intense desert dust outbreaks and their vertical structure based on remote sensing data, Atmos. Chem. Phys., 16, 8609–8642, <https://doi.org/10.5194/acp-16-8609-2016>
- Goudie, A.S. (2014), Desert dust and human health disorders, Environ. Int., 63, 101–113
- Grzegorski, M., Poli, G., Cacciari, A., Jafariserajehlou, S., Holdak, A., Lang, R., Vazquez-Navarro, M., Munro, R., Fougne, B. (2022), Multi-Sensor Retrieval of Aerosol Optical Properties for Near-Real-Time Applications Using the Metop Series of Satellites: Concept, Detailed Description, and First Validation, Remote Sensing, 14(1), 85. <https://doi.org/10.3390/rs14010085>
- Inness, A., Ades, M., Agustí-Panareda, A., Barré, J., Benedictow, A., Blechschmidt, A.-M., Dominguez, J. J., Engelen, R., Eskes, H., Flemming, J., Huijnen, V., Jones, L., Kipling, Z., Massart, S., Parrington, M., Peuch, V.-H., Razinger, M., Remy, S., Schulz, M., Suttie, M. (2019), The CAMS reanalysis of atmospheric composition, Atmos. Chem. Phys., 19, 3515–3556, <https://doi.org/10.5194/acp-19-3515-2019>
- Kallos, G., Nickovic, S., Papadopoulos, A., Jovic, D., Kaliagou, O., Misirlis, N., Boukas, L., Mitikou, N., Sake laridis, G., Papageorgiou, J., Anadranistakis, E. Ma nousakis, M. (1997), The regional weather forecasting system SKIRON: An overview, Proc. Symp. Reg. Weather Pred. Par. Comp. Environ., 1, 109–123
- Mahowald, N., Albani, S., Kok, J. F., Engelstaeder, S., Scanza, R., Ward, D. S., Flanner, M. G. (2014), The size distribution of desert dust aerosols and its impact on the Earth system, Aeolian Research, 15, 53–71, <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2013.09.002>
- Marécal, V., Peuch, V.-H., Andersson, C. S., Arteta, J., Beekmann, M., Benedictow, A., Bergström, R., Bessagnet, B., Cansado, A., Chéroux, F., Colette, A., Coman, A., Curier, R. L., Denier van der Gon, H. A. C. et al. (2015), A regional air quality forecasting system over Europe: the MACC-II daily ensemble production, Geosci. Model Dev., 8, 2777–2813
- Middleton, N., Kang, U. (2017), Sand and dust storms: Impact mitigation. Sustainability, 9, 1053, <https://doi.org/10.3390/su9061053>
- Middleton, N., Tozer, P. Tozer, B. (2019), Sand and dust storms: underrated natural hazards. Disasters, 43, 390–409. <https://doi.org/10.1111/disa.12320>

- Mifka, B., Telišman Prtenjak, M., Kavre Piltaver, I., Mekterović, D., Kuzmić, J., Marciuš, M., Ciglencčki, I. (2023), Intense desert dust event in the northern Adriatic (March 2020); insights from the numerical model application and chemical characterization results, *Earth and Space Science*, 10, e2023EA002879. <https://doi.org/10.1029/2023EA002879>
- Mona, L., Amiridis, V., Cuevas, E., Gkikas, A., Trippetta, S., Vandenbussche, S., Benedetti, A., Dagsson-Waldhauserova, P., Formenti, P., Haefele, A., Kazadzis, S., Knippertz, P., Laurent, B., Madonna, F., Nickovic, S., Papagiannopoulos, N., Pappalardo, G., Pérez García-Pando, C., Popp, T., Rodríguez, S., Sealy, A., Sugimoto, N., Terradellas, E., Vukovic Vimic, A., Weinzierl, B., Basart, S. (2023), Observing Mineral Dust in Northern Africa, the Middle East, and Europe: Current Capabilities and Challenges ahead for the Development of Dust Services, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 104(12), E2223-E2264. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-23-0005.1>
- Monteiro, A., Basart, S., Kazadzis, S., Votsis, A., Gkikas, A., Vandenbussche, S., Tobias, A., Gama, C., García-Pando, C.P., Terradellas, E., Notas, G., Middleton, N., Kushta, J., Amiridis, V., Lagouvardos, K., Kosmopoulos, P., Kotroni, V., Kanakidou, M., Mihalopoulos, N., Kalivitis, N., Dagsson-Waldhauserová, P., El-Askary, H., Sievers, K., Giannaros, T., Mona, L. Hirtl, M., Skomorowski, P., Virtanen, T. H., Christoudias, T., Di Mauro, B., Trippetta, S., Kutuzov, S., Meinander, O., Nickovic, S., (2022), Multi-Sectoral Impact Assessment of an Extreme African Dust Episode in the Eastern Mediterranean in March 2018, *Science of the Total Environment*, 843, 156861. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156861>
- Nickovic, S., G. Kallos, A. Papadopoulos, O. Kakaliagou (2001), A model for prediction of desert dust cycle in the atmosphere, *J. Geophys. Res.*, 106(D16), 18113–18129, doi:10.1029/2000JD900794
- Nickovic, S., Cvetkovic, B., Petković, S., Amiridis, V., Pejanović, G., Solomos, S., Marinou E., Nikolic J., (2021), Cloud icing by mineral dust and impacts to aviation safety, *Sci Rep*, 11, 6411, <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85566-y>
- Pey J, Querol X, Alastuey A, Forastiere F, Stafoggia M (2013), African dust outbreaks over the Mediterranean basin during 2001-2011: PM10 concentrations, phenomenology and trends, and its relation with synoptic and mesoscale meteorology, *Atmos Chem Phys.*, 13, 1395–1410
- Pérez, C., Nickovic, S., Pejanovic, G., Baldasano, J. M., Özsoy E. (2006), Interactive dust-radiation modeling: A step to improve weather forecasts, *J. Geophys. Res.*, 111, D16206, doi:10.1029/2005JD006717
- Querol, X., Tobias, A., Pérez, N., Karanasiou, A., Amato, F., Stafoggia, M., Pérez García-Pando, C., Ginoux, P., Forastiere, F., Gumy, S., Mudu, P., Alastuey, A. (2019), Monitoring the impact of desert dust outbreaks for air quality for health studies *Environ. Int.*, 130, 104867, [10.1016/j.envint.2019.05.061](https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.05.061)
- Querol, X., Pey, J., Pandolfi, M., Alastuey, A., Cusack, M., Perez, N., Moreno, T., Viana, M., Mihalopoulos, N., Kallos, G., Kleanthous, S. (2009), African dust contributions to mean ambient PM10 mass-levels across the Mediterranean Basin, *Atmos. Environ.*, 43(28), 4266–4277, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.06.013>
- Rizza, U., Barnaba, F., Miglietta, M.M., Mangia, C., Di Liberto, L., Dionisi, D., Costabile, F., Grasso, F., Gobbi, G.P. (2017), WRF-Chem model simulations of a dust outbreak over the central Mediterranean and comparison with multisensor desert dust observations, *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 93-115, <http://dx.doi.org/10.5194/acp-17-93-2017>
- Rolph, G., Stein, A., Stunder, B. (2017), Real-time Environmental Applications and Display sYstem: READY, *Environmental Modelling & Software*, 95, 210-228, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.025>

- Ryder, C. L., Marengo, F., Brooke, J. K., Estelles, V., Cotton, R., Formenti, P., McQuaid, J. B., Price, H. C., Liu, D., Ausset, P., Rosenberg, P. D., Taylor, J. W., Choulaton, T., Bower, K., Coe, H., Gallagher, M., Crosier, J., Lloyd, G., Highwood, E. J., Murray, B. J. (2018), Coarse-mode mineral dust size distributions, composition and optical properties from AER-D aircraft measurements over the tropical eastern Atlantic, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 17225–17257, <https://doi.org/10.5194/acp-18-17225-2018>
- Schepanski, K. (2018), Transport of mineral dust and its impact on climate. *Geosciences*, 8(5), 151, <https://doi.org/10.3390/geosciences8050151>
- Stein, A.F., Draxler, R.R., Rolph, G.D., Stunder, B.J.B., Cohen, M.D., Ngan, F. (2015), NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 96, 2059–2077, <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>
- Struckmeier, C., Drewnick, F., Fachinger, F., Gobbi, G. P., Borrmann, S. (2016), Atmospheric aerosols in Rome, Italy: sources, dynamics and spatial variations during two seasons, *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 15277–15299, <https://doi.org/10.5194/acp-16-15277-2016>
- Terradellas E., Werner E., Basart S., Benincasa F. (2020), Model inter-comparison and evaluation of dust forecasts, Technical Report SDS-WAS-2020-001, SDS-WAS NAMEE, Barcelona, 47 pp., <https://sds-was.aemet.es/forecast-products/forecast-evaluation>
- Tositti, L., Brattich, E., Cassardo, C., Morozzi, P., Bracci, A., Marinoni, A., Di Sabatino, S., Porcù, F., Zappi, A. (2022), Development and evolution of an anomalous Asian dust event across Europe in March 2020, *Atmos. Chem. Phys.*, 22, 4047–4073, <https://doi.org/10.5194/acp-22-4047-2022>, 2022
- UNEP (2020), Impacts of Sand and Dust Storms on Oceans: A Scientific Environmental Assessment for Policy Makers. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya, pp 58, ISBN: 978-92-807-3784-4, available at: <https://www.unep.org/>
- Varga, G. (2020), Changing nature of Saharan dust deposition in the Carpathian Basin (Central Europe): 40 years of identified North African dust events (1979–2018), *Environ. Int.*, 139, 105712, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105712>
- Zhang, X., Zhao, L., Tong, D.Q., Wu, G., Dan, M., Teng, B. (2016), A Systematic Review of Global Desert Dust and Associated Human Health Effects, *Atmosphere*, 7(12), 158, <https://doi.org/10.3390/atmos7120158>
- Zhang, J., Reid, J. S., Westphal, D. L., Baker, N. L., Hyer, E. J. (2008), A system for operational aerosol optical depth data assimilation over global oceans, *J. Geophys. Res.*, 113, doi:10.1029/2007JD009065