

ЕПІЗОДИ ЗМІННОСТІ ВМІСТУ Й ХАРАКТЕРИСТИК АЕРОЗОЛЬНИХ ЧАСТИНОК У АТМОСФЕРІ НАД КИЄВОМ У 2022 РОЦІ

Вступ. Аерозолі істотно впливають на енергетичний баланс атмосфери, метеорологічні явища та на рівень забрудненості повітря. Важливим джерелом надходження аерозолів у атмосферу є пожежі рослинного покриву планети. Дистанційні засоби спостережень дозволяють виявляти явища підвищеного вмісту аерозолів у стовпі атмосфери над місцем спостережень і знаходити оптичні й мікрофізичні характеристики аерозольних частинок, що визначають їхню кліматологічну та метеорологічну активність. Аналіз зворотних траєкторій руху повітряних мас дозволяє виявляти розташування джерел і походження частинок.

Методи. Спостереження за аерозолями в атмосфері над Києвом виконано за допомогою сонячного фотометра міжнародної мережі AERONET. За даними цих спостережень визначено розподіл частинок за розмірами, їхні альbedo одноразового розсіювання та комплексний показник заломлення. Для виявлення джерел надходження аерозолів у атмосферу над Києвом обчислено зворотні траєкторії руху повітряних мас протягом кількох діб, що передують часові спостережень. Аналіз зображень земної поверхні, одержаних приладами MODIS із навколоземної орбіти, дозволив виявити осередки пожеж у регіонах, над якими переміщувалися повітряні маси на шляху до Києва.

Результати. Проаналізовано результати спостережень за аерозолями над Києвом протягом 2022 р., виявлено епізоди підвищення вмісту аерозолів над рівнем, типовим для цієї місцевості за даними багаторічних спостережень. Детально розглянуто явища, під час яких аерозольна оптична товщина атмосфери для довжини хвилі 440 нм перевищувала значення 0.4, для яких із достатньою точністю визначено розподіл частинок за розмірами та їхні оптичні характеристики. Проаналізовано зворотні траєкторії повітряних мас. Протягом 23 березня і 23 серпня кількість спостережних даних була достатньою, щоб прослідкувати зміни зазначених параметрів аерозолів протягом дня.

Висновки. Аналіз оптичних і мікрофізичних характеристик аерозольних частинок, усереднених у стовпі атмосфери над місцем спостережень, указав наявність як частинок диму внаслідок пожеж, так і ґрунтового пилу. З аналізу переміщення атмосферних мас встановлено високу ймовірність зв'язку цих явищ із бойовими діями на території України, оскільки такі дії призводять до численних пожеж і викидів у атмосферу диму й пилу. Однак аналіз зворотних траєкторій руху повітря вказує і на те, що частково пилові частинки у квітні цього року були принесені із Сахари, як це відбувається щорічно у цю пору року.

Ключові слова: атмосфера, аерозолі, дистанційні дослідження, AERONET, забрудненість атмосфери.

Вступ

Атмосферні аерозолі, тобто завислі у повітрі дрібні тверді частинки та краплі рідини, відіграють істотну роль у фізичних і хімічних процесах, що протікають у земній атмосфері. Зокрема вони послаблюють потік сонячного світла, а також, будучи центрами конденсації водяної пари в атмосфері, беруть участь у формуванні хмар і впливають на їхні характеристики. Загалом внесок аерозолів у метеорологічні процеси та кліматичні зміни як у глобальному, так і у регіональному масштабах, досі оцінюється з надто великими похибками, що призводить до неприйнятних невизначеностей у результатах моделювання та прогнозування майбутніх змін клімату (Forster et al., 2021). Крім того, аерозольні частинки у приземній атмосфері часом стають причиною відчутного забруднення повітря. Зокрема це трапляється під час таких надзвичайних подій, як пилові бурі або ж масштабні й інтенсивні пожежі рослинності. У Києві таке забруднення було, наприклад, улітку 2010 р. унаслідок масштабних пожеж у європейській частині Росії. Тоді протягом кількох тижнів спостерігали значне забруднення атмосфери над різними регіонами України і сусідніх країн (Galutska et al., 2018). Також лісові пожежі навесні 2020 р. у північних регіонах України призвели до істотного забруднення повітря у Києві (Zhang et al., 2022). Пожежі рослинності часом стають одним із головних джерел надходження аерозолів у земну атмосферу у глобальному масштабі (do Rosário, Sena, Yamasoe, 2022; Holanda et al., 2020).

Вміст і характеристики аерозольних частинок у всьому стовпі атмосфери над усією землею кулею та над окремими регіонами й місцевостями визначаються методами дистанційних спостережень із навколоземної орбіти та із земної поверхні. Наземні дистанційні спостереження за вмістом і параметрами аерозолів у атмосфері над Києвом виконувалися за допомогою сонячного фотометра Київської спостережної станції міжнародної мережі AERONET (Kyiv site, <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>) за програмою AERONET з 2008 р. Ці дослідження виконуються з метою оцінювання внеску аерозолів у регіональні кліматичні зміни в Україні та Східній Європі, а також для оцінювання ступеня забрудненості повітря. За допомогою сонячного фотометра вимірюють опроміненість Сонцем земної поверхні у місці спостережень та яскравість неба вздовж альмукантарату і кола висоти Сонця в окремих спектральних ділянках із діапазону від 0.34 мкм до 1.61 мкм (кількість спектральних каналів залежить від моделі фотометра) (Holben et al., 1998). Із цих спостережних даних за стандартизованими алгоритмами AERONET визначають спектральну оптичну товщину аерозолів у стовпі атмосфери над місцем спостережень, розміри частинок, комплексний показник заломлення та деякі інші параметри, а також одержують оцінки впливу аерозолів на енергетичний баланс атмосфери (Dubovik, & King, 2000; Giles et al., 2019; Sinyuk et al., 2020). Результати цих спостережень у Києві та їхній аналіз за минулі роки викладено у багатьох публікаціях, зокрема у (Galutska et al., 2018; Milinevsky, & Danylevsky, 2018; Zhang et al., 2022). В останній публікації (Wei et al., 2025) розглянуто дані спостережень за аерозолями в атмосфері над Києвом протягом 2020–2024 рр. й зазначено вплив на них бойових дій на території України. Проте це дані, усереднено за кожен рік, і там не проаналізовано детально епізоди підвищення вмісту аерозолів, що спостерігалися протягом кожного року, не досліджено окремо джерела надходження частинок у атмосферу і шляхи їхнього перенесення до Києва, і не проаналізовано вплив пожеж рослинності на

© Данилевський Василь, 2025

характеристики аерозольних частинок. У цій статті наведено результати спостережень із сонячним фотометром протягом 2022 р. та їхній детальний аналіз.

Оцінювання впливу бойових дій на якість повітря в Україні вже висвітлювалося раніше у кількох публікаціях, наприклад у (Savenets et al., 2023; Zalakeviciute et al., 2022). Проте зазначені автори розглядали вплив цих подій на забруднення атмосфери головними газами, такими як NO_2 , CO , O_3 , SO_2 . Тільки у (Zalakeviciute et al., 2022) розглянуто дані наземних станцій моніторингу якості повітря в різних регіонах України, зокрема і в Києві у 2022 р., які містять вимірювання концентрацій частинок із розмірами, не більшими за 2.5 мкм у приземному шарі повітря (параметр $\text{PM}_{2.5}$ якості повітря). Показано, що концентрація цих частинок у Києві під час інтенсивних боїв була нижчою, ніж за попередній час. Але ці дані не містять детальних характеристик частинок, не вказують на їхнє походження. Крім того, АОТ у всьому стовпі атмосфери і концентрація $\text{PM}_{2.5}$ – різні величини за фізичним змістом, і їхні зміни далеко не завжди корелюються, як це показано, наприклад у (Zhang et al., 2022). Метою цієї статті є саме встановлення походження та визначення характеристик аерозольних частинок, що зумовили явища істотного підвищення їхнього вмісту над Києвом за спостереженнями із сонячним фотометром, виконаними протягом 2022 р.

На жаль, бойові дії поблизу та на околицях Києва вплинули на умови спостережень і спричинили перерви у них, так само як і погодні умови (хмарність). Однак були зареєстровані явища підвищеного вмісту аерозолів у атмосфері над Києвом навесні та влітку. Для з'ясування причини цих явищ, а також їхнього впливу на характеристики аерозольних частинок, що переносилися повітряними масами і спостерігались над Києвом, був виконаний детальний аналіз спостережних даних з урахуванням метеорологічних умов і динаміки повітряної маси на різних висотах.

Методи

Застосована тут методика аналізу спостережних даних з огляду на метеорологічну ситуацію вже використовувалась раніше в дослідженні аналогічних явищ, що спостерігались у Києві весною 2020 р. Ця методика викладена у публікації (Zhang et al., 2022). Метеорологічні умови як у місці спостережень, так і у доволі обширному регіоні вздовж траєкторій переміщення атмосферних мас, з якими частинки переносяться, істотно впливають на вміст частинок та їхні характеристики у стовпі атмосфери над місцем спостережень. Зокрема, ці умови та час переміщення впливають на розміри і хімічний склад частинок. У зв'язку із цим у статті значну увагу приділено аналізу траєкторій переміщення повітряних мас. Зокрема були побудовані та проаналізовані зворотні траєкторії переміщення повітряних мас до спостережної станції у Києві, а також використані дані про просторово-часовий розподіл осередків пожеж на території України та сусідніх країн, одержані зі спостережень із навколоромної орбіти приладами MODIS, що встановлені на супутниках NASA Aqua і Terra (<https://modis.gsfc.nasa.gov/data/>). Більшість даних про оптичні й мікрофізичні характеристики аерозольних частинок, що аналізуються нижче, одержано зі спостережень блиску сонячного диска поміж хмарами, або ж поблизу хмар, чи навіть через тонкі хмари. Дані, зареєстровані через хмари, зазвичай, відфільтровують стандартним алгоритмом AERONET (Giles et al., 2019), але в окремих випадках алгоритм не може відрізнити тонку хмару від високого вмісту аерозольних частинок у всьому спостережуваному стовпі атмосфери. Тому такі випадки також розглянуто окремо. В результаті з'ясовано, що причиною окремих явищ підвищеного вмісту аерозолів над Києвом стали ці самі бойові дії як на околицях Києва, так і в інших регіонах України.

Спостережні дані про вміст аерозолів у атмосфері над Києвом у 2022 р. Опис місця спостережень, апаратури та методики спостережень і аналізу даних викладено детально у численних публікаціях, зокрема у (Milinevsky, & Danylevsky, 2018) і наведеної там літературі, тому тут будуть подані дуже коротко. Спостереження виконували за допомогою сонячного фотометра CIMEL CE318-2 (спектральні канали з довжинами хвиль 440, 675, 870, 940 та 1020 нм) на станції AERONET Kyiv (<https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>). Вміст аерозолів у стовпі атмосфери оцінюють за спричиненою ними оптичною товщиною атмосфери (АОТ) в окремих спектральних каналах. Залежність АОТ від довжини хвилі дозволяє оцінити фізичні параметри частинок, зокрема розподіл за розмірами й ефективний розмір, альbedo однократного розсіювання і комплексний показник заломлення, усереднені у всьому стовпі атмосфери над місцем спостережень. Тут аналізуються спостережні дані рівня 1.5, згідно з термінологією, прийнятою в AERONET (Holben et al., 1998; Giles et al., 2019), тобто звільнені від впливу хмарності й інших випадкових чинників, але не виправлені за можливий дрейф характеристик фотометра. Однак досвід роботи з такими фотометрами показує, що для аналізу короткотривалих подій та на проміжках часу порядку місяця ці дані цілком адекватні.

Для оцінювання зміни вмісту аерозолів та параметрів частинок зручно використовувати щоденно усереднені значення АОТ для довжини хвилі 440 нм (рис. 1). У попередній дослідженні (Galutska et al., 2018; Milinevsky, & Danylevsky, 2018) показано, що найімовірніші значення АОТ (440 нм) над Києвом становлять 0.1–0.3. Вищі значення, зазвичай, спостерігають під час особливих подій, що спричинюються явищами інтенсивного надходження аерозольних частинок в атмосферу, і детальний аналіз характеристик цих частинок під час таких подій дозволяє з'ясувати джерела їхнього походження. Такі параметри частинок, як розподіл за розмірами, альbedo однократного розсіювання і показник заломлення визначають за спостережними даними AERONET розв'язуванням відповідної оберненої задачі з прийнятною точністю, якщо АОТ (440 нм) ≥ 0.4 (Dubovik, & King, 2000; Sinyuk et al., 2020).

У ряді даних, наведених на рис. 1, виділяють кілька днів з усередненими значеннями АОТ (440 нм), що перевищують 0.4. Це 23 і 24 березня, 23 і 25 квітня, 11, 12, 20, 23 і 27 серпня. Щоб з'ясувати динаміку аерозолів у ці дні й оцінити надійність спостережень варто детальніше розглянути результати вимірювань, виконаних протягом кожного з них.

Кількість вимірювань протягом зазначених днів була дуже різною, що обумовлено в основному хмарністю. У дати 12, 20 і 27 серпня були одержані всього по одному чи по два вимірювання, тому ці дані далі не розглядатимуться, оскільки є висока ймовірність помилковості вказаних вимірювань. Решту даних показано на рис. 2. Як видно з наведених даних протягом цих днів (за винятком 11 серпня, коли вимірювання вдалося виконати лише протягом короткого проміжку часу) вміст аерозольних частинок у атмосфері над Києвом істотно змінювався. Прогалини у рядах цих даних, що перевищують 15 хв, зумовлені мінливою хмарністю протягом кожного з днів, що могла супроводжуватися дощем, який сприяв видаленню аерозольних частинок. Також зміна вмісту аерозолів залежить від швидкості переміщення повітряних мас, з якими аерозолі можуть надходити до атмосферного стовпа над місцем спостережень або вноситись із нього. Необхідними метеоданими для аналізу даних сонячного фотометра є наявність хмарності й опадів, а також висота хмар. Дуже корисними були б дані про зміну концентрації аерозольних частинок із зміною висоти, однак у Києві (як і в Україні загалом) немає обладнання для таких вимірювань (лідар або ж селіометр). Тому доцільно було обчислити зворотні траєкторії руху повітряних мас на різних

висотах для зазначених дат. Указані метеорологічні параметри (наявність хмарності, час та інтенсивність опадів) одержано за допомогою метеостанції Ambient Weather WS-1002-WiFi Station (<https://ambientweather.com/amws1001wificonsole.html>), встановленої у місці розташування станції AERONET, і дані від якої розміщені на інтернет-сторінці Головної астрономічної обсерваторії НАН України (<https://mao.kiev.ua/weather/belchertown/about/>). Наявність хмарності також можна оцінити й за даними самого сонячного фотометра, оскільки він виконує вимірювання потоку прямого сонячного світла не рідше ніж через кожні 15 хв, і пропуски в цих рядах свідчать про хмари на сонячному диску.

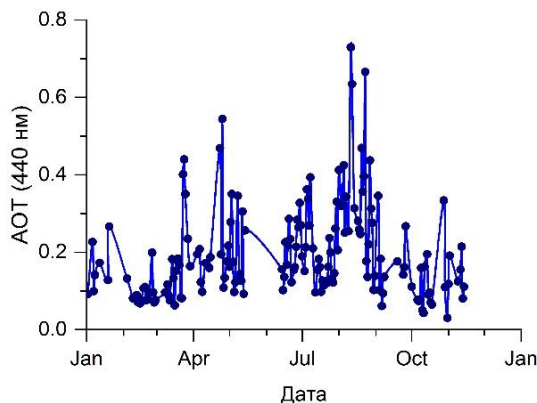


Рис. 1. Ряд щоденно усереднених значень AOT (440 нм) в атмосфері над Києвом протягом 2022 р.

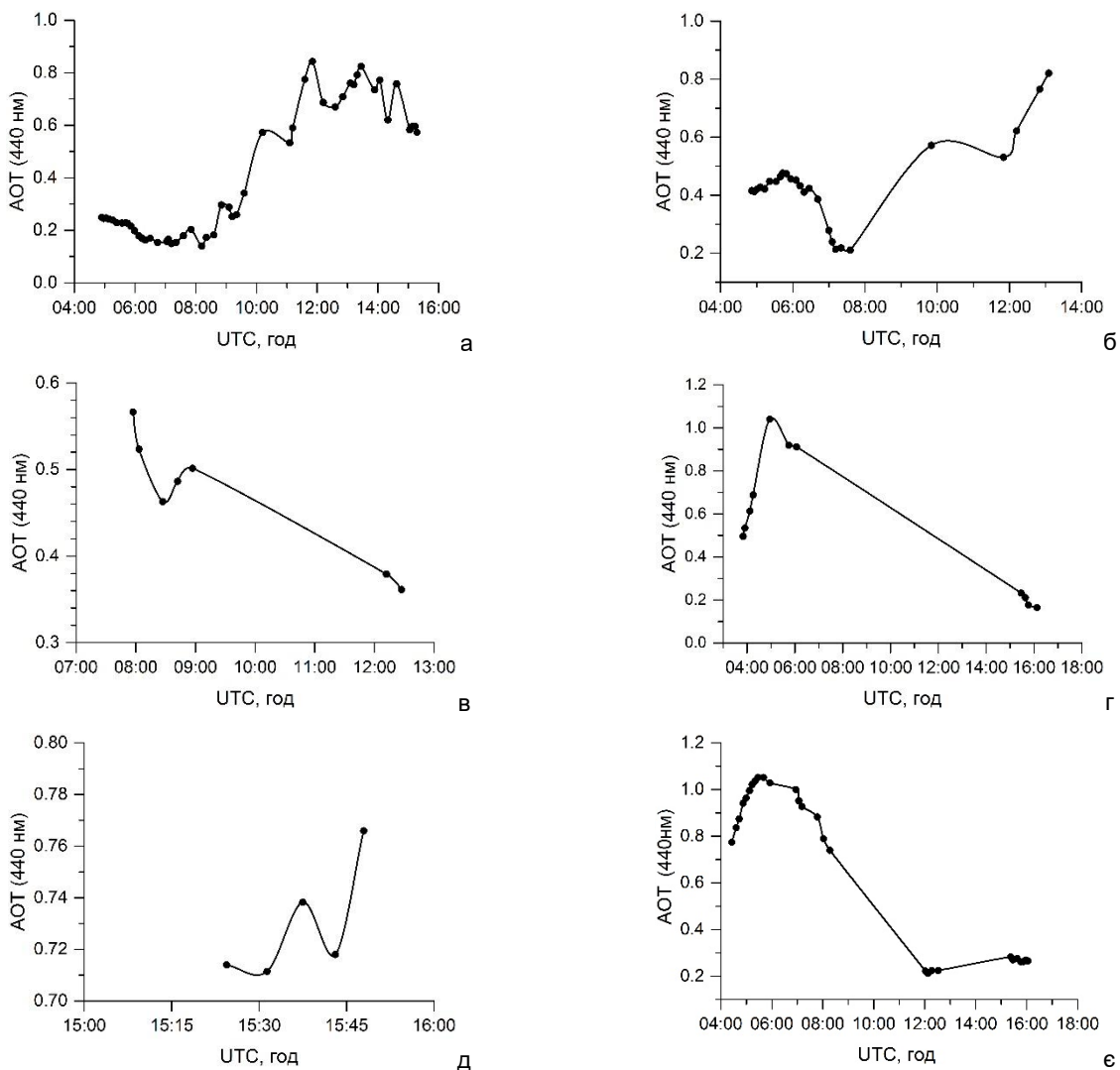


Рис. 2. Спостережені значення оптичної товщини аерозолів у атмосфері над Києвом 2022 р.: а – 23 березня; б – 24 березня; в – 23 квітня; г – 25 квітня; д – 11 серпня; е – 23 серпня. Часову шкалу на рисунках наведено для Гринвіцького меридіана

Зворотні траєкторії руху повітряних мас. Зворотні траєкторії руху повітряних мас до Києва на кожен із днів, протягом якого спостереження аналізувалися, були обчислені за допомогою моделі HYSPLIT (Stein et al., 2015) з дистанційним доступом до неї через інтернет-сторінку AERONET / Data Synergy Tool (https://aeronet.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/bamgommas_interactive). Модель HYSPLIT використовує поля метеорологічних даних для відповідного географічного регіону, тобто дані, одержані з метеорологічних спостережень і відповідного моделювання. Для цього використовують Глобальну систему асиміляції даних (Global Data Assimilation System – GDAS, <https://www.ncei.noaa.gov/access/metadata/landing-page/bin/iso?id=gov.noaa.ncdc:C00379>) Національного центру інформації про довкілля, США. Типова похибка обчислень траєкторій становить приблизно 20 % довжини траєкторії (Stohl, 1998). У цій роботі зворотні траєкторії обчислено на проміжку 3 доби до моменту прибуття повітряних мас до місця спостережень на висотах 100 м, 500 м, 1, 2 і 3 км над землею поверхнею з інтервалом 1 година (рис. 3). Варто зауважити, що висота земної поверхні у місці спостережень над рівнем земного еліпсоїда (тобто рівнем моря) становить приблизно 190 м, а висота горизонтальної осі, на якій закріплена світловимірювальна головка сонячного фотометра, становить приблизно 10 м над землею поверхнею. Отже вимірювання виконуються сонячним фотометром на висоті 200 м над рівнем земного еліпсоїда. Це висота основи атмосферного стовпа над місцем спостережень, у якому й визначаються вміст і параметри аерозольних частинок.

Для кожної із зазначених дат зі значними змінами вмісту аерозолів над Києвом зворотні траєкторії обчислено на ранішній час (9 год місцевого часу), і на післяпудневий час (15 год місцевого часу), щоб мати уявлення про можливі зміни напрямку переміщень повітряних мас протягом часу спостережень. Тільки 11 серпня, коли спостережні дані були одержані протягом проміжку часу, що менший години, траєкторії обчислені на початок і кінець години спостережень (рис. 3 л, м). Верхня частина кожного з рисунків на рис. 3(1), 3(2), 3(3) показує переміщення пробного об'єму атмосфери у площині проєкції на земну поверхню, а нижня – зміни висоти пробного об'єму. Зворотні траєкторії дозволяють оцінити швидкість переміщення атмосферних мас, а вибір висот і часових інтервалів дозволяє скласти достатньо детальну картину їхнього руху.

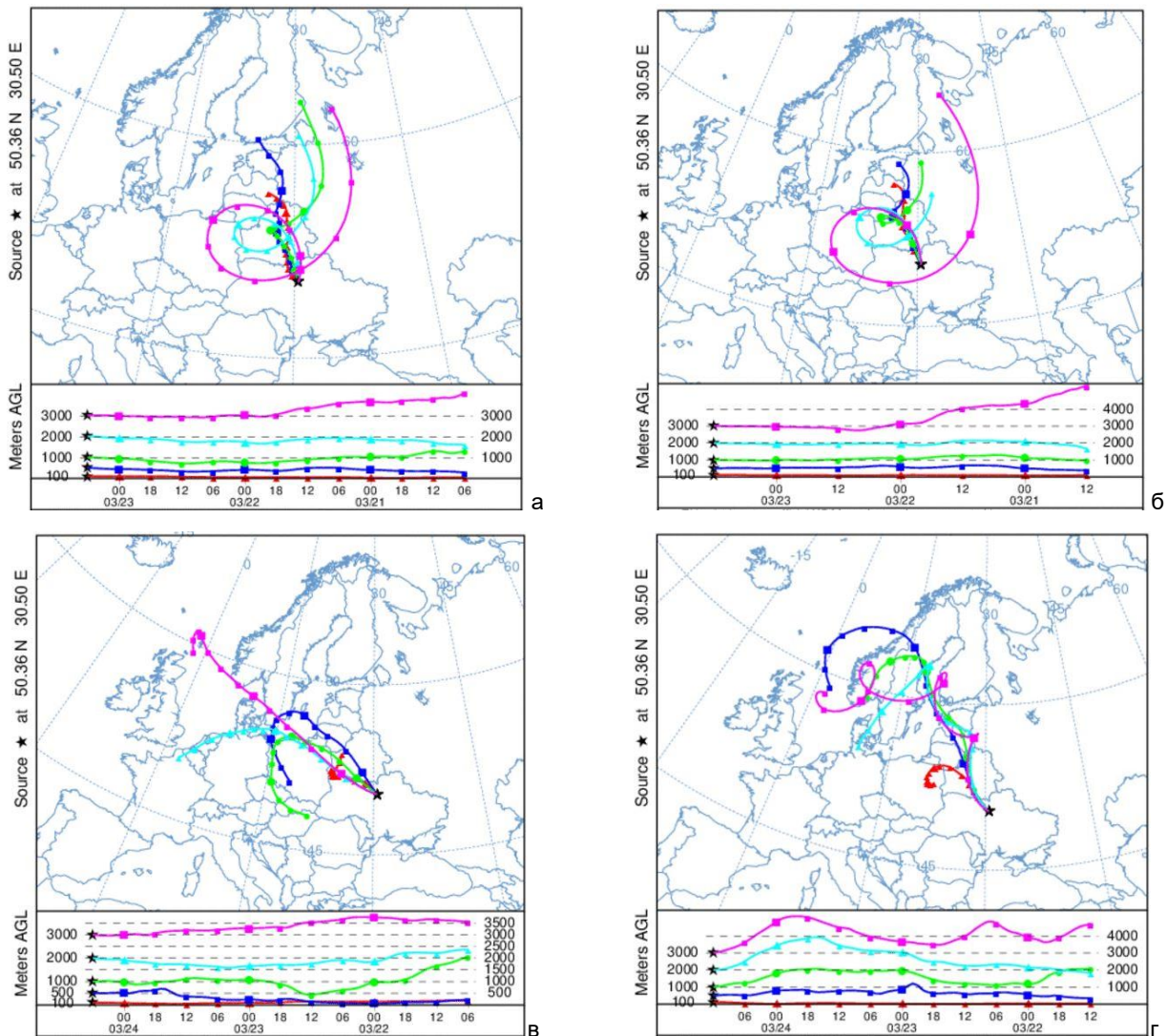


Рис. 3(1). Зворотні траєкторії повітряних мас від Києва: а) 23 березня 2022 р. з прибуттям до місця спостережень о 6 год UTC; б) 23 березня, 12 год UTC; в) 24 березня, 6 год UTC; г) 24 березня, 12 год UTC. Час у шкалі UTC, тобто для 0-го меридіана

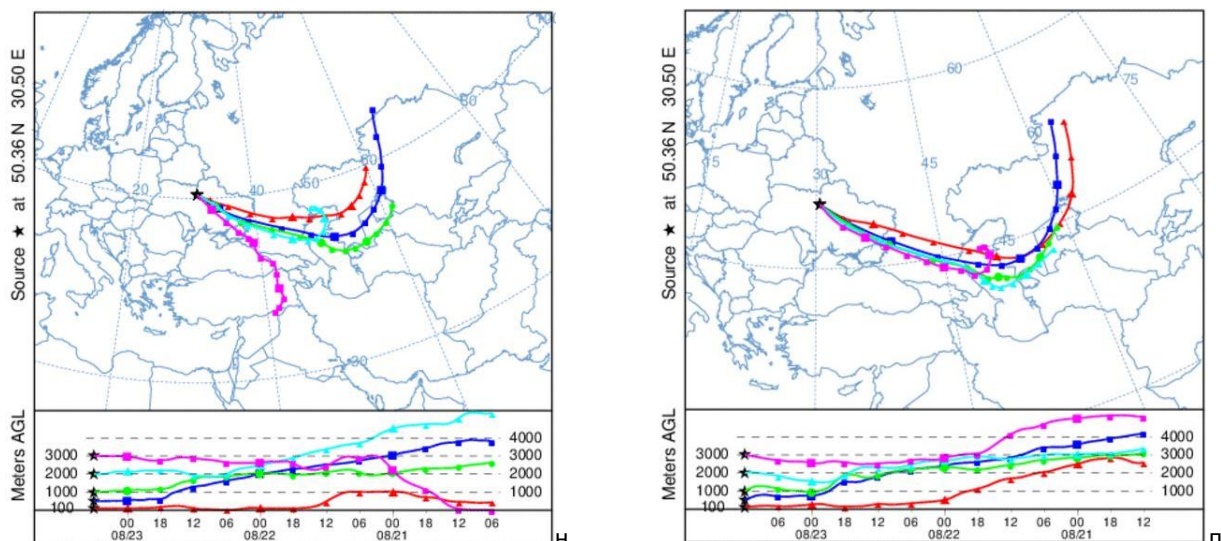


Рис. 3(3). Зворотні траєкторії повітряних мас від Києва:
 м) 11 серпня, 16 год UTC; н) 23 серпня, 6 год UTC; п) 23 серпня, 12 год UTC.
 Час у шкалі UTC, тобто для 0-го меридіана

Результати

Динаміка вмісту аерозолів і переміщення повітряних мас. 23 березня вміст аерозольних частинок у стовпі атмосфери над Києвом зранку був відносно низьким, значення АОТ (440 нм) $\approx 0.1\text{--}0.3$ (рис. 2а), що є типовим для станції AERONET Kyiv. Він почав зростати близько полудня, досягнувши значень АОТ (440 нм) ≈ 0.8 усього за приблизно півтори години. Тобто близько полудня до Києва почало надходити повітря, збагачене аерозольними частинками. Зважаючи на зміни АОТ, із часом після приблизно 8 год UTC (10 год за київським часом), до місця спостережень надходило повітря зі змінною концентрацією аерозолів, що все ж таки наростала із часом. Це означає, що ця повітряна маса почала збагачуватися аерозольними частинками десь на маршруті її траєкторій. Протягом усього дня напрямок руху повітряних мас із північного заходу був практично незмінним у всьому діапазоні висот від земної поверхні до 3 км (рис. 3а, 3б). Причому протягом останніх приблизно 12 год на висотах від 100 м до 1000 м повітряні маси рухалися над територією України з боку Білорусі.

Упродовж 24 березня напрямок зворотних траєкторій дещо змінювався. Зранку повітря надходило по напрямку з дещо меншим азимутом (тобто відхиленням на захід), ніж напередодні (рис. 3в). У цьому разі вміст аерозолів над Києвом зменшувався (рис. 2б), але знову почав зростати приблизно після 8 год UTC (10 год за київським часом). На час максимальних значень АОТ напрямок руху повітряних мас знову став практично тим самим, що і днем раніше (рис. 3г), хоча швидкість вітру на всіх висотах збільшилась.

Варто зазначити, що протягом березня у північних районах Київщини точилися бої, що призводило до пожеж і викидів ґрунтового пилу у повітря. Це могло стати джерелом аерозолів, що спостерігалися у Києві. Для остаточного з'ясування локалізації джерел надходження аерозолів у атмосферу потрібні додаткові дані про розподіл пожеж, які можна було б добути з даних супутникових спостережень, наприклад супутника MODIS, однак через хмарність над зазначеною територією не вдалося знайти відповідних зображень на час супутникових спостережень, тому ці дані потребують спеціального опрацювання.

Підвищений вміст аерозолів протягом 23 і 25 квітня, що спостерігався у першій половині кожного із цих днів, та його зменшення до вечора (рис. 2в, 2г), відбувалися під впливом повітряних мас, що надходили до Києва з південно-східного й південного напрямку на висотах від 100 м до 1000 м, і з південно-західного на висотах від 2 км до 3 км 23 квітня, а 25 квітня з південно-західного напрямку в усьому діапазоні висот (рис. 3д, 3е, 3ж, 3к). Тут слід звернути увагу, що траєкторії на висотах 2 км і 3 км, а зранку 25 квітня і на 1 км, сягають північних і північно-західних регіонів Африки. Такий напрямок руху повітряних мас типовий для України в цю частину року, і щорічне зростання вмісту аерозолів над Києвом у цей час частково пов'язувалося з надходженням пилу із Сахари (Milinevsky, & Danylevsky, 2018). Інше їхнє джерело на цю пору року – спалювання сухою рослинністю на полях південних регіонів України, і часом пиліві бурі там. Звичайно, цього року бойові дії на півдні України також зробили свій внесок, оскільки вони є причиною численних пожеж і викидів продуктів горіння і пилу.

11 серпня спостережні дані вдалося одержати тільки ввечері протягом менш як півгодини (з 15:25 по 15:48 UTC), через хмарність (рис. 2д). Повітряні маси на цей час (рис. 3л, 3м) на висотах від 100 м до 1 км надходили до Києва з північно-східного напрямку, з європейської частини Росії, приблизно з Підмосков'я, хоча останні 6–12 год проходили над північно-східною частиною України (Сумська, Чернігівська і Київська області). Зворотні траєкторії повітряних мас, що прийшли до Києва на висотах 2 км і 3 км, надійшли приблизно з південного Уралу і півночі Казахстану через східні області України. Зазвичай у цей період звідти приносяться аерозольні частинки, що складаються з ґрунтового пилу та продуктів лісових пожеж. Цього ж року варто зауважити, що поблизу східного кордону та на території України (Харківська, Луганська області), де відбувалися інтенсивні бойові дії, ці траєкторії проходять практично над землею поверхнею (рис. 3л, 3м). Тому є висока ймовірність того, що значна частина аерозолів, що була принесена до Києва, надійшла у повітря саме внаслідок цих подій.

До того самого висновку приводить і аналіз переміщення повітряних мас протягом 23 серпня, коли у першій половині дня спостережувана АОТ була дуже високою, приблизно від 0.77 до 1.05 (рис. 2д). Зранку цього дня повітряні

маси на висотах від 100 м до 2 км, а ввечері й на висоті 3 км надходили до Києва з південного Уралу та Казахстану через південний схід України (Донецька, Запорізька, Дніпропетровська області), тобто над зоною бойових дій (рис. 3н, 3п). Розподіл осередків горіння на зазначених територіях протягом цього дня видно зі знімків, одержаних приладами MODIS на супутниках NASA Aqua і Terra (<https://modis.gsfc.nasa.gov/about/>) і позначених жовтогарячими точками на рис. 4а, 4б. На цьому рисунку місце станції AERONET Київ позначено колом у лівому верхньому куті кожного зображення. Жовтогаряча і блакитна смуги на зображеннях відповідають переміщенню центра поля зору приладів MODIS, а також позначають траєкторію руху на цей час ще одного супутника NASA CALIPSO (<https://www-calipso.larc.nasa.gov/>), на борту якого встановлено лідар CALIOP (<https://space.oscar.wmo.int/instruments/view/calipor>), за даними якого після спеціального опрацювання визначають розподіл аерозольних частинок за висотою. Ці дані можуть бути надалі використані для детальнішого аналізу динаміки аерозолів над зазначеними територіями.

Швидке зниження AOT протягом цього дня пов'язується головно з впливом хмар поблизу Києва, бо за їхньої наявності відбувається конденсація пари на аерозолях і вони стають гідрозолями, тобто краплинами хмар, що випадають дощем. Причому кількість частинок у міжхмарних проміжках, коли виконуються вимірювання AOT, істотно зменшується.

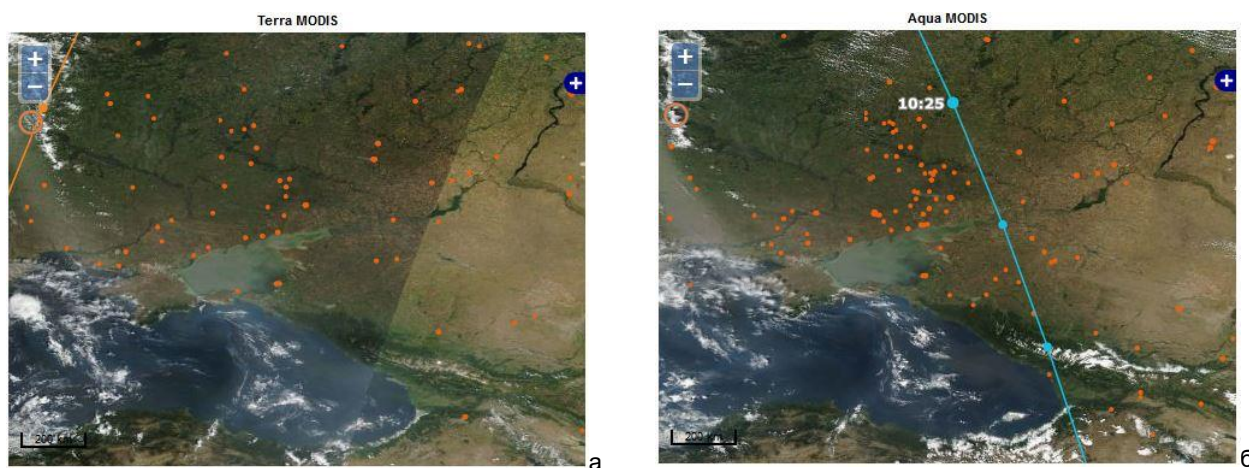


Рис. 4. Розподіл осередків пожеж за спостереженнями приладів MODIS, установлених на супутнику Terra (а) і Aqua (б) 23 серпня 2022 р.

Оптичні й мікрофізичні характеристики аерозольних частинок. Оптичні (спектральні альbedo одноразового розсіювання, показник заломлення, фазова функція та параметр її асиметрії) і мікрофізичні (розподіл за розмірами, еквівалентні та медіанні радіуси і параметри форми) характеристики частинок визначають із вимірювань сонячним фотометром розподілу яскравості небесної сфери вздовж альмукантарату Сонця та кола його висоти. Для цього за даними вимірювань розв'язують обернену некоректно поставлену задачу. Через її некоректність зазначені параметри визначаються з прийнятною точністю тільки для вимірювань для AOT (440 нм) ≥ 0.4 , якщо кількість вимірювань достатня (Dubovik, & King, 2000; Sinyuk et al., 2020). Для Києва, як і для практично всіх європейських станцій, це трапляється під час таких особливих подій, тому й була можливість визначити характеристики частинок і навести тут ці дані, одержані на зазначені дати.

В алгоритмі розв'язання зазначеної оберненої задачі в AERONET розподіл частинок за розмірами моделюється лог-нормальною функцією. Зазвичай він двомодальний. На рис. 5 показано зміни усередненого у стовпі атмосфери розподілу частинок за розмірами протягом 23 березня та 23 серпня, бо в ці дні таких даних одержано найбільше і можна спостерігати еволюцію частинок із часом. Протягом 23 березня зміни AOT, а відповідно і вмісту аерозолів у стовпі атмосфери, відбувалися за рахунок дрібнодисперсної моди сферичних частинок із радіусами від 0.05 мкм до приблизно 0.7 мкм (рис. 5а). Їхня кількість почала швидко зростати приблизно після 11 год UTC. А протягом 23 серпня зміна AOT відбувалася за рахунок зменшення у стовпі атмосфери кількості частинок крупнодисперсної моди з радіусами приблизно від 0.5 до 15 мкм (рис. 5б) – від найбільшого вмісту їх уранці до практично повного видалення під вечір. Зазвичай, у наших умовах превалювання крупнодисперсної фракції характерне для частинок пилового походження та у разі інтенсивних пожеж поблизу місць спостережень, коли виділяється велика кількість сажі у вигляді її агломератів під час фази горіння з полум'ям. Частинок дрібнодисперсної фракції характерні для продуктів горіння, що спостерігаються на значних відстанях від місць пожеж, коли крупнодисперсні частинки видаляються з повітряного потоку, осідаючи на землю, а залишаються лише дрібні частинки сажі або ж частинки, утворені з газових продуктів горіння та складових атмосфери. Однак у випадку переміщення на значні відстані розміри частинок також можуть зростати за рахунок гідратації чи коагуляції, залежно від метеорологічних умов (температура, вміст водяної пари).

На оптичну товщину аерозольної складової атмосфери істотно впливають і оптичні характеристики частинок, що визначаються їхнім хімічним складом і структурою. Усереднені у стовпі атмосфери значення спектрального альbedo однократного розсіювання (SSA – Single Scattering Albedo) та спектральний комплексний показник заломлення (RI – Refractive Index) визначаються зі спостережень за зазначеним вище стандартним алгоритмом. Приклади цих даних для зазначених вище дат показано на рис. 6.

Протягом 23 березня оптичні характеристики частинок змінювалися відповідно до змін AOT і розподілу за розмірами. Три ранішні спектральні криві SSA (рис. 6а) мають у середньому вищі значення, ніж одержані після 9 год UTC, тобто ці частинки мали менші коефіцієнти поглинання порівняно з тими, що надходили до Києва цього дня

пізніше. Відповідно і значення дійсної частини показника заломлення (рис. 6б) у цих частинок у середньому вищі, ніж у пізніших. Найімовірніше, це тверді частинки з високою оптичною відбивною здатністю. Протягом другої половини дня відбивна здатність частинок зменшувалася, дійсний показник заломлення теж зменшувався. Причому, згідно з даними рис. 5а, зменшувався і їхній розмір. Така комбінація розподілу за розмірами і спектральних характеристик SSA та RI характерна для аерозолів, що виникають під час пожеж рослинності у нашій місцевості, згідно з даними, одержаними у (Zhang et al., 2022).

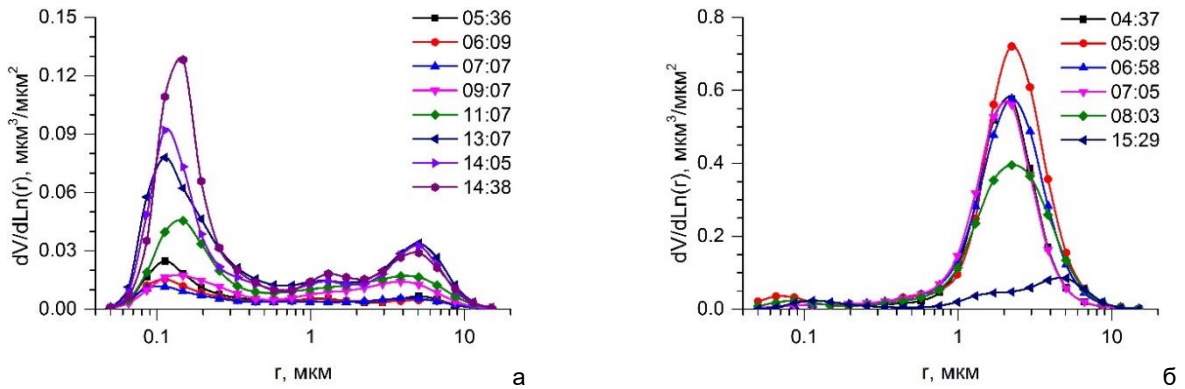


Рис. 5. Розподіли за розмірами аерозольних частинок у стовпі атмосфери над Києвом упродовж: а – 23 березня; б – 23 серпня 2022 р.

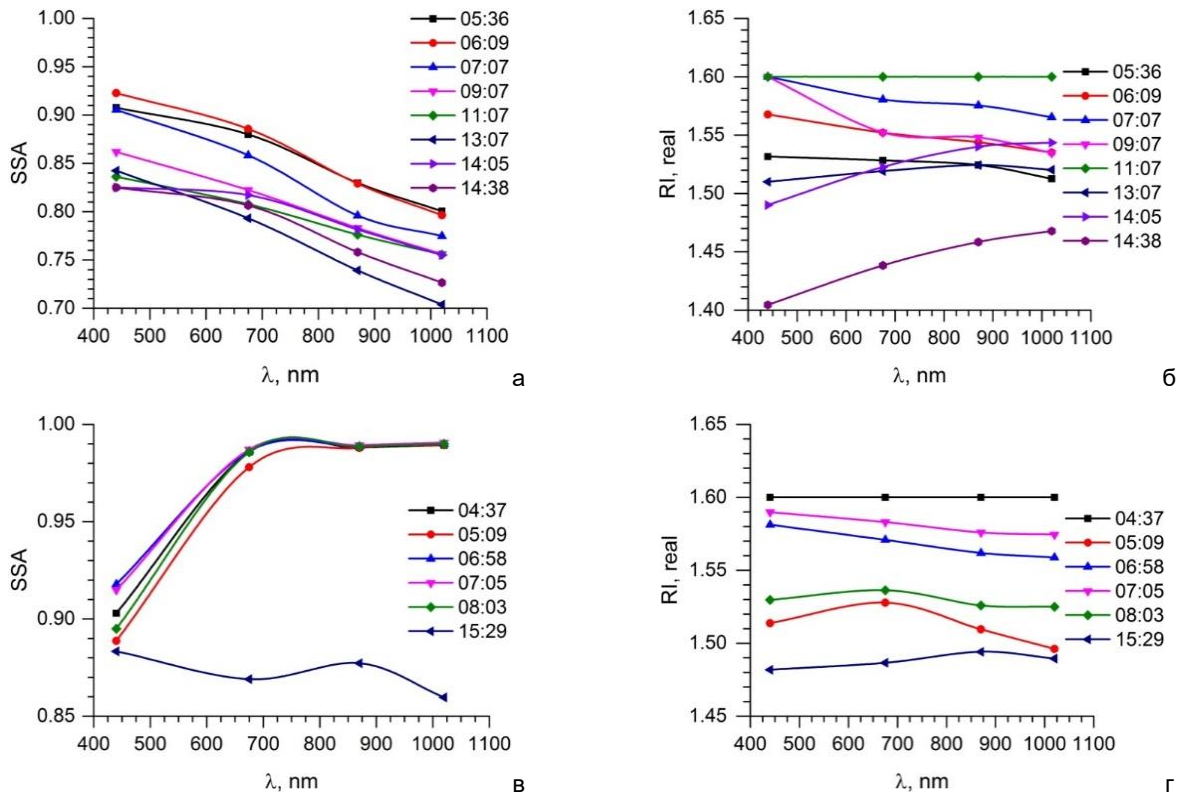


Рис. 6. Оптичні спектральні характеристики аерозольних частинок у атмосфері над Києвом: а, б – 23 березня; в, г – 23 серпня 2022 р.

Спектральні характеристики частинок протягом 23 серпня (рис. 6в, 6г) істотно відрізнялися від розглянутих характеристик 23 березня. Спектральний розподіл SSA у першій половині цього дня характерний для крупнодисперсних частинок пилового походження, що піднімаються в атмосферу під час пилових бур, транспортом на дорогах, зокрема й вибухами (Zhang et al., 2022), це бачимо і з рис. 5б. Дійсна частина показника заломлення ($RI \approx 1.50 \div 1.60$) та його практично рівномірна спектральна характеристика теж характерна для твердих частинок типу силікатів. І тільки значення SSA і RI, одержані у вечірній час цього дня, більше відповідають частинкам, що спостерігалися 23 березня.

Дискусія і висновки

У статті наведено результати дистанційних досліджень аерозолів у атмосфері над Києвом, що виконувались за допомогою сонячного фотометра на Київській спостережній станції міжнародної мережі AERONET у 2022 р. Протягом цього року були зареєстровані явища підвищеного вмісту аерозольних частинок у стовпі атмосфери над Києвом, під час яких АОТ (440 нм) протягом окремих днів набувала значень від 0.5 до 1.0 і вище. Такі явища 23 і 24 березня,

25 квітня, 11 і 23 серпня проаналізовано детально, оскільки в ці дні була одержана достатня кількість спостережних даних. З аналізу переміщення атмосферних мас встановлено високу ймовірність зв'язку цих явищ із бойовими діями на території України, оскільки такі дії призводять до численних пожеж і викидів у атмосферу диму й пилу.

Аналіз оптичних і мікрофізичних характеристик аерозольних частинок, усереднених у стовпі атмосфери над місцем спостережень теж вказує наявність тут і частинок диму внаслідок пожеж, і ґрунтового пилу. Також аналіз зворотних траєкторій руху повітря вказує і на те, що частково пилові частинки у квітні цього року були принесені із Сахари, як це відбувається щорічно у цю пору року (Milinevsky, & Danylevsky, 2018).

Однак для встановлення походження аерозолів під час зазначених подій необхідні додаткові дослідження, зокрема із залученням даних щодо просторово-часового розподілу кількості й інтенсивності пожеж чи пилових бур, наприклад зі спостережень супутникових приладів MODIS тощо, а також розподілу аерозолів за висотою згідно з даними супутникового лідара CALIOP. Такі дослідження пов'язані з опрацюванням великої кількості спостережних даних із цих приладів, тому мають бути виконані окремо.

Джерела фінансування. Роботу виконано за рахунок фінансування Міністерством освіти і науки України проєктів із номерами держреєстрації 0124U001660 (держбюджетна тема № 22БФ023-04 Астрономічної обсерваторії) та 0125U002259 (держбюджетна тема № 25БФ051-02 фізичного факультету) Київського національного університету імені Тараса Шевченка, і частково Головної астрономічної обсерваторії НАН України.

Список використаних джерел

- Do Rosário, N. É., Sena, E. T., & Yamasoe, M. A. (2022). South American 2020 regional smoke plume: intercomparison with previous years, impact on solar radiation, and the role of Pantanal biomass burning season. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22, 15021–15033. <https://doi.org/10.5194/acp-22-15021-2022>
- Dubovik, O., & King, M. D. (2000). A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements. *Journal of Geophysical Research*, 105, 20673–20696. <https://doi.org/10.1029/2000JD900282>
- Forster, P., Storelvmo, T., Armour, K., Collins, W., Dufresne, J.-L., Frame, D., Lunt, D.J., Mauritsen, T., Palmer, M.D., Watanabe, M., Wild, M., Zhang, H. (2021). *The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity*. In Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou, Eds., *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (p. 923–1054). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.009>
- Galytska, E., Danylevsky, V., Hommel, R., & Burrows, J. P. (2018). Increased aerosol content in the atmosphere over Ukraine during summer 2010. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11, 2101–2118. <https://doi.org/10.5194/amt-11-2101-2018>
- Giles, D. M., Sinyuk, A., Sorokin, M. G., Schafer, J. S., Smirnov, A., Slutsker, I., Eck, T. F., Holben, B. N., Lewis, J. R., Campbell, J. R., Welton, E. J., Korkin, S. V., & Lyapustin, A. I. (2019). Advancements in the Aerosol Robotic Network (AERONET) Version 3 database – automated near-real-time quality control algorithm with improved cloud screening for Sun photometer aerosol optical depth (AOD) measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12, 169–209. <https://doi.org/10.5194/amt-12-169-2019>
- Holanda, B. A., Pöhlker, M. L., Walter, D., Saturno, J., Sörgel, M., Ditas, J., Ditas, F., Schulz, C., Franco, M. A., Wang, Q., Donth, T., Artaxo, P., Barbosa, H. M. J., Borrmann, S., Braga, R., Brito, J., Cheng, Y., Dollner, M., Kaiser, ... Pöhlker C. (2020). Influx of African biomass burning aerosol during the Amazonian dry season through layered transatlantic transport of black carbon-rich smoke. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20, 4757–4785. <https://doi.org/10.5194/acp-20-4757-2020>
- Holben, B., Eck, T., Slutsker, I., Tanré, D., Buis, J., Setzer, A., Vermote, E., Reagan, J., Kaufman, Y., Nakajima, T., Lavenu, F., Jankowiak, I., & Smirnov, A. (1998). AERONET – A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization. *Remote Sensing of Environment*, 66, 1–16. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(98\)00031-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00031-5)
- Milnevsky G., & Danylevsky, V. (2018). Atmospheric Aerosol Over Ukraine Region: Current Status of Knowledge and Research Efforts. *Frontiers in Environmental Science*, 6, 1–21. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00059>
- Savenets, M., Osadchyi, V., Komisar, K., Zhemera, N., & Oreshchenko, A. (2023). Remotely visible impacts on air quality after a year-round full-scale Russian invasion of Ukraine. *Atmospheric Pollution Research*, 14(11), 101912. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2023.101912>
- Sinyuk, A., Holben, B. N., Eck, T. F., Giles, D. M., Slutsker, I., Korkin, S., Schafer, J. S., Smirnov, A., Sorokin, M., & Lyapustin, A. (2020). The AERONET Version 3 aerosol retrieval algorithm, associated uncertainties and comparisons to Version 2. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13, 3375–3411. <https://doi.org/10.5194/amt-13-3375-2020>
- 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. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96, 2059–2077. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>
- Stohl, A. (1998). Computation, accuracy and applications of trajectories – a review and bibliography. *Atmospheric Environment*, 32, 947–966. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00457-3](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00457-3)
- Wei, X., Yukhymchuk, Y., Danylevsky, V., Milnevsky, G., Goloub, P., Fesianov, I., Syniavskyi, I., Turos, O., Maremukha, T., Petrosian, A., Kyslyi, V., & Shi, Y. (2025). Impact of military activity on atmospheric aerosol characteristics in Ukraine and Kyiv city. *Atmospheric Pollution Research*, 16 (6), 102496. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2025.102496>
- Zalakeviciute, R., Mejia, D., Alvarez, H., Bermeo, X., Bonilla-Bedoya, S., Rybarczyk, Y., & Lamb, B. (2022). War Impact on Air Quality in Ukraine. *Sustainability*, 14, 13832. <https://doi.org/10.3390/su142113832>
- Zhang, C., Shulga, V., Milnevsky, G., Danylevsky, V., Yukhymchuk, Y., Kyslyi V., Syniavskyi, I., Sosonkin, M., Goloub, P., Turos, O., Simon, A., Choliy, V., Maremukha, T., Petrosian, A., Pysanko, V., Honcharova, A., Shulga, D., Miatselskaya, N., & Morhuleva, V. (2022). Spring 2020 Atmospheric Aerosol Contamination over Kyiv City. *Atmosphere*, 13, 687–1–687-20. <https://doi.org/10.3390/atmos13050687>

References

- Do Rosário, N. É., Sena, E. T., & Yamasoe, M. A. (2022). South American 2020 regional smoke plume: intercomparison with previous years, impact on solar radiation, and the role of Pantanal biomass burning season. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22, 15021–15033. <https://doi.org/10.5194/acp-22-15021-2022>
- Dubovik, O., & King, M. D. (2000). A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements. *Journal of Geophysical Research*, 105, 20673–20696. <https://doi.org/10.1029/2000JD900282>
- Forster, P., Storelvmo, T., Armour, K., Collins, W., Dufresne, J.-L., Frame, D., Lunt, D.J., Mauritsen, T., Palmer, M.D., Watanabe, M., Wild, M., Zhang, H. (2021). *The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity*. In Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou, Eds., *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (p. 923–1054). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.009>
- Galytska, E., Danylevsky, V., Hommel, R., & Burrows, J. P. (2018). Increased aerosol content in the atmosphere over Ukraine during summer 2010. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11, 2101–2118. <https://doi.org/10.5194/amt-11-2101-2018>
- Giles, D. M., Sinyuk, A., Sorokin, M. G., Schafer, J. S., Smirnov, A., Slutsker, I., Eck, T. F., Holben, B. N., Lewis, J. R., Campbell, J. R., Welton, E. J., Korkin, S. V., & Lyapustin, A. I. (2019). Advancements in the Aerosol Robotic Network (AERONET) Version 3 database – automated near-real-time quality control algorithm with improved cloud screening for Sun photometer aerosol optical depth (AOD) measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12, 169–209. <https://doi.org/10.5194/amt-12-169-2019>
- Holanda, B. A., Pöhlker, M. L., Walter, D., Saturno, J., Sörgel, M., Ditas, J., Ditas, F., Schulz, C., Franco, M. A., Wang, Q., Donth, T., Artaxo, P., Barbosa, H. M. J., Borrmann, S., Braga, R., Brito, J., Cheng, Y., Dollner, M., Kaiser, ... Pöhlker C. (2020). Influx of African biomass burning aerosol during the Amazonian dry season through layered transatlantic transport of black carbon-rich smoke. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20, 4757–4785. <https://doi.org/10.5194/acp-20-4757-2020>
- Holben, B., Eck, T., Slutsker, I., Tanré, D., Buis, J., Setzer, A., Vermote, E., Reagan, J., Kaufman, Y., Nakajima, T., Lavenu, F., Jankowiak, I., & Smirnov, A. (1998). AERONET – A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization. *Remote Sensing of Environment*, 66, 1–16. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(98\)00031-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00031-5)

- Milinevsky G., & Danylevsky, V. (2018). Atmospheric Aerosol Over Ukraine Region: Current Status of Knowledge and Research Efforts. *Frontiers in Environmental Science*, 6, 1–21. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00059>
- Savenets, M., Osadchyi, V., Komisar, K., Zhemera, N., & Oreshchenko, A. (2023). Remotely visible impacts on air quality after a year-round full-scale Russian invasion of Ukraine. *Atmospheric Pollution Research*, 14(11), 101912. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2023.101912>
- Sinyuk, A., Holben, B. N., Eck, T. F., Giles, D. M., Slutsker, I., Korkin, S., Schafer, J. S., Smirnov, A., Sorokin, M., & Lyapustin, A. (2020). The AERONET Version 3 aerosol retrieval algorithm, associated uncertainties and comparisons to Version 2. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13, 3375–3411, <https://doi.org/10.5194/amt-13-3375-2020>
- 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. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96, 2059–2077. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>
- Stohl, A. (1998). Computation, accuracy and applications of trajectories – a review and bibliography. *Atmospheric Environment*, 32, 947–966. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00457-3](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00457-3)
- Wei, X., Yuhymchuk, Y., Danylevsky, V., Milinevsky, G., Goloub, P., Fesianov, I., Syniavskiy, I., Turos, O., Maremukha, T., Petrosian, A., Kyslyi, V., & Shi, Y. (2025). Impact of military activity on atmospheric aerosol characteristics in Ukraine and Kyiv city. *Atmospheric Pollution Research*, 16 (6), 102496. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2025.102496>
- Zalakeviciute, R., Mejia, D., Alvarez, H., Bermeo, X., Bonilla-Bedoya, S., Rybarczyk, Y., & Lamb, B. (2022). War Impact on Air Quality in Ukraine. *Sustainability*, 14, 13832. <https://doi.org/10.3390/su142113832>
- Zhang, C., Shulga, V., Milinevsky, G., Danylevsky, V., Yuhymchuk, Y., Kyslyi V., Syniavskiy, I., Sosonkin, M., Goloub, P., Turos, O., Simon, A., Choliy, V., Maremukha, T., Petrosian, A., Pysanko, V., Honcharova, A., Shulga, D., Miatselskaya, N., & Morhuleva, V. (2022). Spring 2020 Atmospheric Aerosol Contamination over Kyiv City. *Atmosphere*, 13, 687-1–687-20. <https://doi.org/10.3390/atmos13050687>

Отримано редакцією журналу / Received: 26.02.25

Прорецензовано / Revised: 28.04.25

Схвалено до друку / Accepted: 08.07.25

Vasyl DANYLEVSKY, PhD (Phys. & Math.), Senior Researcher
 ORCID ID: 0000-0001-8311-0907
 e-mail: vdanylevsky@knu.ua
 Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine,
 Main astronomical observatory of NAS of Ukraine

EPISODES OF VARIABILITY OF THE AEROSOL PARTICLES CONTENT AND PROPERTIES IN THE ATMOSPHERE OVER KYIV IN 2022

Background. *Aerosols significantly affect the energy balance of the atmosphere, meteorological phenomena and the level of air pollution. An important source of aerosols entering the atmosphere are fires of the planet's vegetation. Remote sensing allows to detect phenomena of increased aerosol content in the atmospheric column above the observation site and determine the optical and microphysical properties of aerosol particles, which determine their climatological and meteorological activity. Analysis of the back trajectories of air masses allows to identify the location of sources and the origin of particles.*

Methods. *Observations of aerosols in the atmosphere over Kyiv were carried out using a sun photometer of the international AERONET network. According to these observations, the size distribution of particles, their single-scattering albedo and complex refractive index are determined. To identify the sources of aerosols entering the atmosphere over Kyiv, the back trajectories of air masses are calculated for several days preceding the time of observations. Analysis of images of the Earth's surface obtained by MODIS instruments from near-earth orbit allows us to identify fire locations in the regions over which air masses moved on their way to Kyiv.*

Results. *The results of aerosol observations over Kyiv during 2022 were analyzed, episodes of an increase in aerosol content above the level typical for this area according to long-term observations were identified. The phenomena during which the aerosol optical thickness of the atmosphere at a wavelength of 440 nm exceeded 0.4 were considered in detail, for which the particle size distribution and their optical characteristics were determined with sufficient accuracy. The back trajectories of air masses were analyzed. During March 23 and August 23, the amount of observational data was sufficient to track changes in the specified aerosol parameters during the day.*

Conclusions. *Analysis of the optical and microphysical characteristics of aerosol particles averaged in the atmospheric column above the observation site indicated the presence of both smoke particles from fires and soil dust. Analysis of the movement of atmospheric masses established a high probability of connection of these phenomena with battles in Ukraine, since such actions lead to numerous fires and emissions of smoke and dust into the atmosphere. However, analysis of the back trajectories of air movement also indicates that some of the dust particles in April of this year were brought from the Sahara, as happens annually at this time of a year.*

Keywords: *atmosphere, aerosols, remote sensing, AERONET, atmospheric pollution.*

Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The author declares no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.