

## **Стан забруднення аерозолем атмосфери над Києвом за дистанційними дослідженнями засобами AERONET та вплив на нього лісових пожеж улітку 2010 р.**

Київський національний університет імені Тараса Шевченка. м. Київ  
e-mail: egalytska@gmail.com

**Анотація.** Аерозолі у земній атмосфері є не тільки забруднювачами повітря, а й чинником, що впливає на формування клімату. Дослідження динаміки аерозольного шару, властивостей аерозольних частинок, виявлення джерел їх надходження у атмосферу є однією з актуальних задач сучасної метеорології, кліматології, фізики атмосфери, екології. Для цих досліджень застосовуються методи дистанційних наземних та супутникових вимірювань оптичних властивостей аерозольних частинок, а також дослідження динаміки атмосфери та моделювання процесів переносу частинок.

У роботі за даними досліджень аерозолів засобами AERONET та методом побудови зворотних траєкторій руху повітряних мас визначений рівень забруднення аерозолями атмосфери над Києвом протягом 2008 – 2013 рр., виявлені шляхи їхнього надходження та оцінений внесок від стихійних лісових пожеж у серпні 2010 р. Протягом часу спостережень щомісячно усереднена оптична товща аерозольного шару над Києвом при довжині хвилі оптичного випромінювання 440 нм перебувала у межах 0.05 – 0.45, тоді як на коротших проміжках часу вона змінювалася у значно ширшому діапазоні. Так, 15 серпня 2010 р. ця величина досягла значення 1.5, що було пов'язане з надходженням аерозолів від стихійних лісових пожеж у Росії улітку того року. Загалом середньомісячне значення оптичної товщі у серпні 2010 р. над Києвом перевищувало середнє для цього місяця за увесь період спостережень приблизно на 45%.

**Ключові слова:** аерозолі, AOD, AERONET, сонячний фотометр, зворотні траєкторії, HYSPLIT.

### **Вступ**

Аерозоль – це дрібні тверді частинки або ж краплини рідини мінерального або органічного складу, що містяться у земній атмосфері розподіленими у всій її товщі – від приземних до найвищих шарів. Аерозолі, дисперсна фаза яких складається з краплинок рідини, спостерігаються у вигляді туману, а тверда дисперсна фаза може бути димом або пилом або смогом. Діапазон розмірів аерозольних частинок доволі широкий – від нанометрів до десятків мікрон [17]. Актуальність досліджень аерозолів у земній атмосфері пов'язана як з негативним впливом аерозольних частинок на органи дихання, шкіру, слизові оболонки людей та живих організмів, так і з їхньою кліматотвірною роллю, яка проявляється через вплив на енергетичний баланс кліматичної системи Землі. Аерозолі впливають на земний клімат через два ключові процеси: прямий вплив шляхом розсіювання і поглинання сонячного випромінювання та непрямий вплив, за якого аерозольні частинки виступають ядрами конденсації водяної пари і таким чином впливають на процеси формування хмар, їхню кількість та оптичні властивості, змінюючи при цьому альбедо Землі у місцевому та планетарному масштабах [19, 15].

У глобальному масштабі основними джерелами аерозолів в атмосфері є природні (виверження вулканів, лісові пожежі, морська поверхня), тому переважаючими компонентами є морська сіль і пил. Істотний внесок дає і природна життєдіяльність рослин, виділяючи пилок, а також деякі гази, що беруть участь у формуванні аерозольних частинок у атмосфері (так звані гази – прекурсори). Однак антропогенні аерозолі, що в основному виникають безпосередньо з різних джерел горіння, зокрема і біомаси, а також і з газів-прекурсорів індустриального походження, можуть домінувати у густонаселених і промислово розвинених регіонах [19, 8]. Для дослідження вмісту аерозолів, його властивостей і динаміки в атмосфері використовуються дистанційні методи, засновані на вимірюваннях оптичних характеристик аерозолів. Ефективність таких досліджень обумовлена тим, що завдяки розмірам основного числа аерозольних частинок вони ефективно взаємодіють з сонячним випромінюванням оптичного діапазону спектру (від ~ 0,1  $\mu\text{m}$  до кількох ~ 10  $\mu\text{m}$  [17]. В той час як супутникові спостереження забезпечують дані про глобальний розподіл аерозолів, наземні вимірювання дозволяють отримати неперервні та тривалі ряди надійних даних для вивчення характеристик аерозолів протягом тривалого часу у кожному з місць спостережень. Для наземних досліджень динаміки аерозолів створюються спеціальні національні, регіональні та глобальні мережі дослідницьких установ з технічно узгодженими засобами та методами досліджень. Такі мережі можуть створюватись як тимчасово, так і на час проведення дослідницької кампанії. Це, наприклад, SURFRAD/AOD (<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/surfrad/index.html>); SKYNET (<http://atmos.cr.chiba-u.ac.jp/>); EARLINET (<http://www.earlinet.org/>); MPLNET (<http://mplnet.gsfc.nasa.gov/>); AERONET (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov>) та інші.

Найбільш розвинутою мережею дистанційного моніторингу серед вказаних вище є міжнародна мережа автоматичних сонячних фотометрів AERONET (**AE**rosol **RO**botic **NET**work). Ця мережа була заснована Національним космічним агентством США (NASA) та Національним центром наукових досліджень Франції (CNRS – Centre National de la Recherche Scientifique), представленим Лабораторією оптики атмосфери Університету наук і технологій м. Ліля (Університет Лілля 1), в 90-х роках ХХ століття. Усього AERONET нараховує декілька сотень діючих станцій у всьому світі. Основним принципом цієї мережі є стандартизація обладнання і його метрологічного забезпечення, методів вимірювань і обробки результатів, які зберігаються у централізованій базі даних. Засоби й методи вимірювань та обробки даних, а також використовувана термінологія викладені у [16] та у документації, розміщеній на інтернет-сторінці AERONET (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>).

Дослідження властивостей аерозолу над Києвом за програмою AERONET у Києві розпочалися наприкінці березня 2008 р. [11,10]. Відтоді накопичена значна кількість даних, які дозволили оцінити вміст та властивості аерозольних частинок над Києвом та виявити певні закономірності динаміки аерозолу у цьому регіоні, зокрема і з залученням даних супутникових досліджень та вимірювань засобами AERONET у сусідніх регіонах Східної Європи (див. наприклад [3, 6]). Одним із важливих завдань таких досліджень є виявлення джерел та шляхів надходжень аерозолів різного походження до київського регіону [4, 5] і, зокрема, унаслідок стихійних пожеж [1]. Значна увага міжнародної наукової спільноти протягом останніх років була привернута до досліджень аерозольного забруднення атмосфери унаслідок стихійних великомасштабних лісових пожеж у центральних і західних регіонах Росії улітку 2010 р. (див. наприклад [23, 18, 9]). У пропонованій статті подаються оцінки впливу цих явищ на забруднення атмосфери над Києвом, які раніше не досліджувались детально, за даними вимірювань оптичних властивостей аерозолів з сонячним фотометром AERONET.

### **Матеріали та методи** **Методи спостережень та спостережні дані**

Основним засобом досліджень у мережі AERONET є автоматичні сонячні фотометри CIMEL CE-318 виробництва CIMEL Electronique, Франція. Це спектрорадіометри, оснащені світлофільтрами для окремих вузьких, з півшириною смуги пропускання приблизно 10 нм, стандартних спектральних ділянок у діапазоні від 340 до 1640 нм. Довжини хвиль цих ділянок підібрані так, щоб уникнути смуг поглинання сонячного випромінювання газами атмосфери (крім релєївського розсіювання), такими як водяна пара, кисень, озон тощо. Набір світлофільтрів залежить від моделі фотометра. Київська станція AERONET, розташована на території Головної астрономічної обсерваторії НАНУ в Голосіїві (південна околиця Києва), протягом 2008 – 2012 рр. була оснащена сонячним радіометром CIMEL CE-318-2 (поляризаційна модель) з фільтрами для 440, 670, 870, 936 та 1020 nm. Автономність фотометрів забезпечується живленням від акумуляторів та сонячних батарей. Процедура вимірювань виконується під управлінням мікропроцесора за спеціальною програмою, і визначається положенням Сонця на небесній сфері, яке обчислюється мікропроцесором на кожен поточний день. Згідно з цією програмою для послідовності моментів часу, що відповідають певним зенітним відстаням Сонця, фотометр вимірює опроміненість прямим сонячним випромінюванням у місці спостережень при зазначених довжинах хвиль та розподіл яскравості неба вздовж альмукантарату Сонця та вздовж кола його висоти, використовуючи для цього два окремі оптичні канали з різним рівнем чутливості [16]. Поле зору кожного з каналів обмежується спеціальним коліатором і становить 1.2°.

У середньому вимірювання прямого сонячного випромінювання фотометром виконуються кожні 15 хвилин у діапазоні зенітних відстаней Сонця від 75° і менше. Результати вимірювань накопичуються у пам'яті фотометра і за розкладом, як правило двічі на день, автоматично передаються до комп'ютера і через інтернет надсилаються до бази даних AERONET, де у автоматичному режимі опрацьовуються за прийнятими у AERONET алгоритмами. Первинні та опрацьовані дані розміщуються на інтернет-сторінці станції Київ а також стають доступними для копіювання через відповідні опції сторінки. Зазначена процедура опрацювання первинних даних, що надходять від фотометра, полягає у їх розшифруванні і фільтруванні, а саме у видаленні помилкових даних та даних, обтяжених впливом хмар. Згідно з прийнятою в AERONET класифікацією спостережних даних за їхньою точністю первинні несортовані та нефільтровані дані мають рівень точності 1.0, а відфільтровані від впливу хмар дані мають рівень точності 1.5. Дані найвищої точності та гарантованої якості, отримані після урахування хмарності та повторного калібрування фотометра і врахування змін його характеристик мають рівень 2.0. Калібрування фотометра виконується щонайменше раз на рік на спеціальних спостережних станціях та у лабораторіях за допомогою спеціального обладнання і процедур, описаних у [16] та у документації AERONET.

За спостережними даними визначаються оптичні характеристики аерозольного шару та оптичні й мікрофізичні характеристики аерозольних частинок, усереднені у стовпі атмосфери над місцем спостережень. З найвищою точністю визначається спектральна оптична товща аерозольного шару за вимірюваннями опроміненості прямим сонячним випромінюванням у місці спостережень. Якщо ж вдається одержати необхідну кількість даних про розподіл яскравості неба вздовж альмукантарату та

кола висоти Сонця, то шляхом розв'язування оберненої задачі одержуються й такі характеристики аерозольних частинок, як розподіл за розмірами, альбедо однократного розсіювання, фазову функцію, комплексний показник заломлення тощо [13, 14]. Однак у цій роботі ми аналізуємо лише оптичну товщу аерозолу (згідно з прийнятою в AERONET термінологією вона позначається AOD – Aerosol Optical Depth), що визначається за відомим законом закон Бугера-Ламберта-Бера для екстинції випромінювання:

$$E(\lambda) = E_0(\lambda) \cdot \exp(-\tau(\lambda)),$$

де  $E(\lambda)$  – виміряна спектральна освітленість;  $E_0(\lambda)$  – спектральна позаатмосферна освітленість,  $\tau(\lambda)$  – спектральна оптична товща атмосфери у напрямі на Сонце [17, 16]. При цьому спектральна оптична товща аерозолів визначається шляхом урахуванням релєївського розсіювання світла та  $E(\lambda)$  = поглинання молекулами основних атмосферних газів, водяної пари, вуглекислого газу, інших малих складових атмосфери:

$$AOD(\lambda) = \tau(\lambda) - \tau(\lambda)_{water} - \tau(\lambda)_{Rayleigh} - \tau(\lambda)_{CO_2} - \dots$$

Абсолютні похибки визначення AOD за цією процедурою становлять приблизно 0.01 [16]. Визначена таким чином AOD є мірою вмісту аерозольних частинок у вертикальному стовпі атмосфери одиничного перерізу над місцем спостережень, оскільки

$$AOD(\lambda) = \int_0^Z \int_{r_{min}}^{r_{max}} \sum \left( \frac{2\pi r}{\lambda}, m(\lambda) \right) * \frac{dN(z)}{dr} * dr * dz \quad (1)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі випромінювання;  $Z$  – висота верхньої межі аерозольного шару над місцем спостережень;  $r_{min}$ ,  $r_{max}$  – максимальний і мінімальний розміри аерозольних частинок;  $\Sigma$  – площа перерізу екстинції аерозольної частинки, яка залежить від співвідношення між розмірами частинки  $r$  та довжиною хвилі випромінювання (параметр розміру) і від комплексного показника заломлення частинки  $m(\lambda)$  [2, 17];  $dN/dr$  – розподіл частинок за розмірами у стовпі атмосфери, який загалом змінюється з висотою, як проте, й інші параметри частинок. Як впливає з оцінок [2] та ін. змінність усередненої площі перерізу екстинції  $\Sigma$  аерозольних частинок значно менше впливає на AOD, ніж площа їхнього сумарного геометричного перерізу, що визначається інтегралом функції розподілу частинок за розмірами.

### Динаміка атмосфери та зворотні траєкторії аерозольних частинок

Однією із причин змін вмісту аерозолів у стовпі атмосфери над місцем спостереження є перенесення їх повітряними потоками. Для досліджень такого вітрового переносу аерозольних частинок створені спеціальні моделі руху повітряних мас і алгоритми розрахунків, які дозволяють обчислювати траєкторії переміщення елементарного (пробного) об'єму повітря протягом відносно тривалого проміжку часу (від годин до декількох днів). Ці методи широко використовуються в метеорології, кліматології, екології при дослідженні процесів переміщення атмосферних домішок та виявлення напрямів і джерел їхнього надходження, див. напр. [22, 4, 5]. Одним із таких методів виявлення джерела надходження аерозолів у місце спостережень є так званий метод зворотних траєкторій, за яким траєкторія руху елементарного об'єму повітря обчислюється назад у часі починаючи від моменту спостережень. Отже, зворотна траєкторія – це шлях елементарного об'єму повітря до того, як він прибув до місця спостережень. Вважається, що повітряна маса, що проходить над джерелом емісії аерозолів на висотах, де концентрація частинок достатньо висока, захоплює їх і переносить далі, причому концентрація захоплених частинок може зменшуватися за рахунок дифузії, осаджень та хімічних перетворень. Створено чимало алгоритмів та комп'ютерних програм для обчислень зворотних траєкторій. Однією з таких програм є HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model). Вона створена спільно у Національній адміністрації США з досліджень океану й атмосфери (NOAA) та у метеорологічному Бюро Австралії і доступна для широкого використання (див. [http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT\\_info.php](http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT_info.php)). Нами використана модель HYSPLIT-4, що є останньою із серії цих програм [12].

В основу розрахунків HYSPLIT покладена кінематична модель Лагранжа, яка обчислює траєкторії руху повітряної частки у ейлерівському полі швидкостей, враховуючи лише дані поля вітру [21]. Основою моделі Лагранжа є кінематичне рівняння руху:

$$\frac{dx}{dt} = v(x, t), x(0) = x_0 \quad (2)$$

де  $v(x, t)$  – швидкість як функція від положення та часу;  $x_0$  – початкове положення об'єму повітря  $x$  – вектор поточного положення об'єму.

Для обчислень траєкторій використовуються метеорологічні дані, які є результатами розрахунків чисельних метеорологічних моделей [7]. Для більшості програм розрахунку траєкторій, оперативні моделі та результати реаналізу є ключовими елементами. Прогностичні центри здійснюють суворий контроль за якістю великих об'ємів даних. Асиміляційні дані поєднуються з прогностичними даними чисельних моделей для впровадження високоякісного аналізу та глобальної тривимірної візуалізації отриманих результатів.

При будь-яких розрахунках траєкторій існує ймовірність виникнення похибок. Для реальних атмосферних потоків основними джерелами похибок є похибки визначення параметрів вітру з метеорологічних спостережень або при апроксимації моделі Ейлера у вузлах сітки; недостатня кількість вимірювань цих параметрів у вузлах сітки і, як наслідок, похибки інтерполювання даних; похибки чисельного інтегрування рівняння руху повітряних мас.

Типові значення похибок обчислень положень об'єму повітря становлять приблизно 20%, але вони істотно змінюються від випадку до випадку, зокрема можуть бути відносно незначними, якщо для обчислень траєкторій використовується достатня кількість точних даних, але можуть бути й значними [21]. У нашому випадку використовувалась достатня кількість вхідних даних і похибки обчислених траєкторій можна вважати типовими.

## Результати

Як вже зазначено, рівень аерозольного забруднення атмосфери тут характеризується оптичною товщею аерозольного шару AOD. На рис.1 показані зміни щомісячно усереднених значень AOD над Києвом, визначених за вимірюваннями з сонячним фотометром AERONET зі світлофільтром 440 нм, протягом 2008 – 2013 рр. (рівень точності даних 2.0). Діапазон цих значень AOD(440 нм) становить приблизно 0.05 – 0.45. Аналіз аналогічних даних інших станцій AERONET показав, що приблизно такі ж значення характерні для усіх великих європейських міст (Париж, Москва, Мюнхен тощо) та урбанізованих густо заселених регіонів, див. напр. [6]. Проте змінність вмісту аерозольних частинок на коротших відрізках часу (тижні, дні) значно вища і відображає місцеві умови та особливості надходження аерозолів у атмосферу. На рис. 2 показаний ряд щоденно усереднених значень AOD(440 нм) над Києвом (рівень 2.0) для цього ж проміжку часу. Діапазон цих значень більший у декілька разів від діапазону щомісячно усереднених.

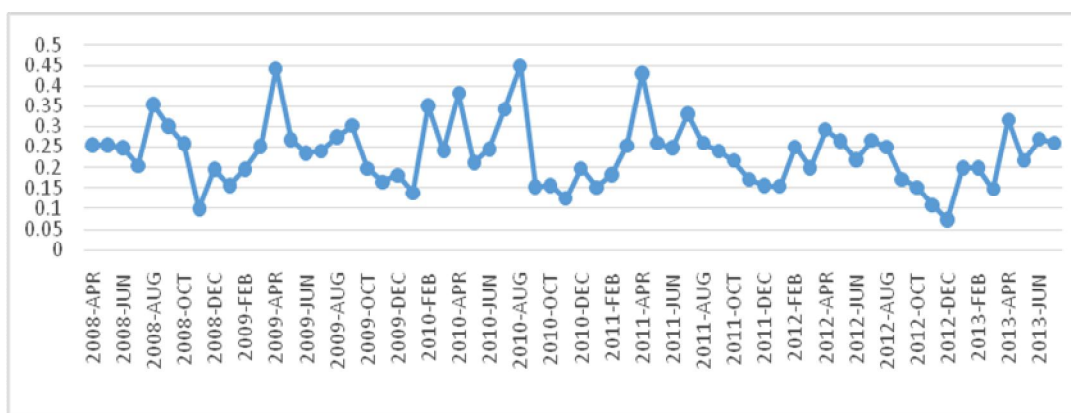


Рис.1. Середньомісячні значення AOD у м. Києві.

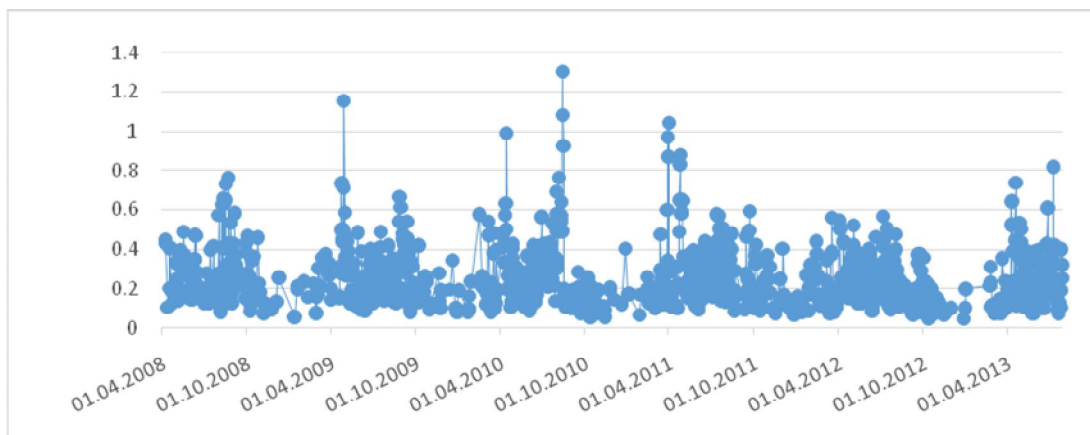


Рис. 2. Середньодобові значення AOD

Використання середньомісячних значень полегшує аналіз і виявлення особливостей динаміки аерозолію на тривалих проміжках часу. Зокрема з рис. 1 видно, що існує сезонна закономірність у змінах вмісту аерозолів над Києвом (як, проте, і над іншими регіонами північної і південної півкулі, розташованими на суходолі), а саме його зростання у весняно-літній період і зменшення протягом осені-зими. Причина цього очевидна – улітку у атмосферу надходить значно більше аерозольних частинок як природного (біологічного походження, головним чином унаслідок горіння рослинності, пилок) і антропогенного (пил від транспорту, сільськогосподарських робіт і т.п.). Як правило спостерігаються два “пікових” періоди: весна (квітень-травень) і друга половина літа (липень-серпень). Характерною особливістю Києва є те, що весняний “пік” як правило перевищує літній, лише у 2010 р. ця закономірність порушилася – вміст аерозолію у серпні був значно вищим, ніж навесні.

Це явище, очевидно, є наслідком стихійних лісових пожеж, що трапилися у центральних та західних регіонах Росії і спричинили значне забруднення атмосфери над обширними територіями Східної Європи димом та іншими аерозолями, зокрема ґрунтовим пилом (див. напр. [18, 9]). Дані про локалізацію та інтенсивність пожеж у цьому регіоні влітку 2010 р. одержані супутниковим приладом MODIS (MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer) – спектрорадіометр зображень середньої роздільної здатності, встановлений на супутниках NASA Aqua і Terra, а також іншими приладами, що вимірювали інтенсивність випромінювання від земної поверхні і атмосфери в ультрафіолетовій (OMI) та інфрачервоній (AIRS) ділянках оптичного спектру з супутників серії A-Train [23]. Дані знаходяться у вільному доступі на офіційні сторінці FIRMS – (Fire Information for Resource Management System) інформація про пожежі для системи управління ресурсами (<https://earthdata.nasa.gov/data/near-real-time-data/firms>). Використовуючи ці дані та результати вимірювань AOD з сонячним фотометром AERONET можна ідентифікувати джерела надходження аерозолів до Києва та оцінити вплив лісових пожеж протягом зазначеного періоду на забруднення атмосфери над Києвом.

Згідно з нашими вимірюваннями максимальний вміст аерозолію над Києвом у 2010 р. спостерігався 15 серпня (рис.2). Динаміка аерозольного забруднення атмосфери протягом цього дня показана на рис. 3. Цей випадок можна використати як приклад для аналізу явища забруднення. Вміст аерозолів протягом цього дня був таким, що AOD(440 нм) істотно перевищувала її середнє для цього місяця значення (0.45) у 2.5 – 3 рази. Максимум був зафіксований після 15 години за часом Грінвіцького меридіана (рис.3) і становив майже 1.5, що є рекордним значенням для усього часу спостережень у Києві.

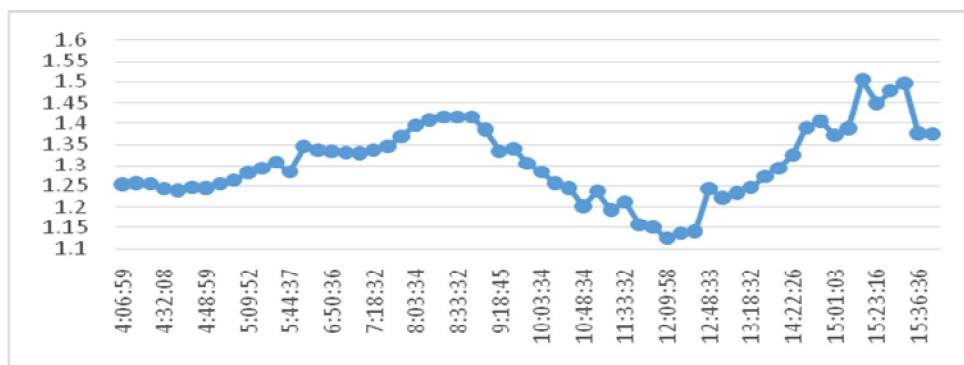


Рис. 3. Розподіл AOD протягом 15 серпня 2010 року

Джерело такого забруднення можна встановити, побудувавши зворотні траєкторії для об’ємів повітря, що надійшли на середину цього дня на різних висотах. На рис. 4 показані основні траєкторії повітряних мас, що надійшли до Києва на висотах 500, 1500 та 3000 м на 11 годину за Грінвичем (14 година місцевого літнього часу). Отже, повітряні маси, що надійшли на висотах 500 і 1500 м, за тиждень до зазначеного моменту перебували поблизу кордону Росії з Казахстаном на висоті більше 3 км. Протягом двох діб вони, поступово втрачаючи висоту, досягли Києва і приблизно через добу, усе ще зменшуючи висоту перемістилися на територію Росії, зайняту лісовими пожежами. Над цими територіями вони переміщувались протягом майже двох діб на висотах 500 і 1500 м відповідно, збагачуючись димом і пилом, після чого знову надійшли до Києва. Траєкторія об’єму повітря, що надійшло до Києва на висоті 3 км, за тиждень до цього почалася над Кавказом, на висоті близько 2 км, і протягом доби піднявшись до 3 км переміщувалась протягом 2-х діб над Каспійським морем і звідти через степові райони півдня Росії через приблизно 4 доби надійшла до Києва, майже не змінюючи висоти і практично не проходячи над територіями, охопленими інтенсивними лісовими пожежами (рис.5). Хоча, як видно з рис.5, на шляху цієї повітряної маси теж траплялись пожежі, проте імовірність її істотного збагачення димом та аерозолем іншого походження набагато нижча, ніж тих повітряних мас, що надійшли на двох нижчих висотах. Спеціальні дослідження розподілу аерозолію з висотою над районами лісових пожеж у Росії на цей період за допомогою супутникового лідара CALIOP (супутник CALIPSO з групи A-Train) показали, що максимум цього розподілу перебував на

висоті біля 1 км і швидко спадав як зі зменшенням висоти, так і зі збільшенням [20]. Це дає підстави стверджувати, що головним джерелом надходження аерозолів до Києва 15 серпня 2010 р. були саме охоплені лісовими пожежами території Росії, і максимум концентрації аерозолію над Києвом перебував на висотах приблизно 1 км.

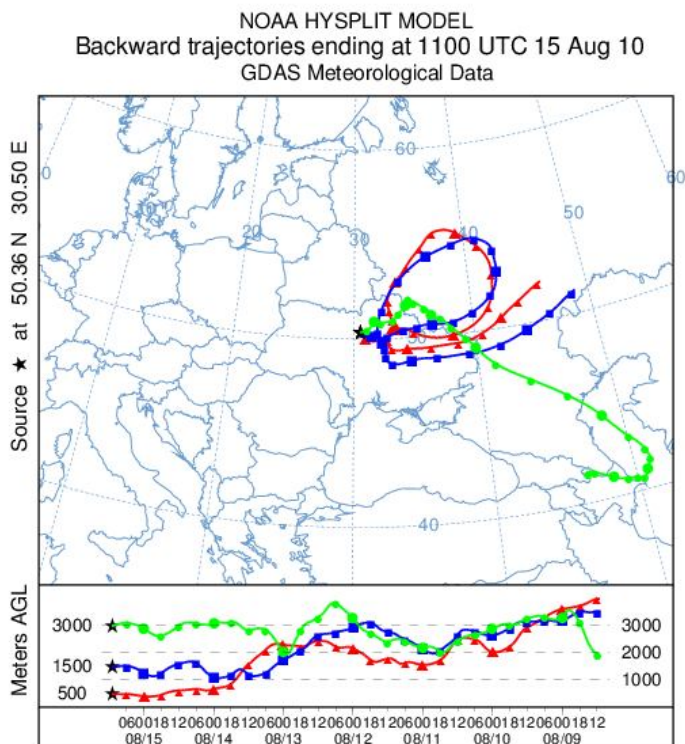


Рис. 4. Траєкторії елементарних об'ємів повітря станом на 11 UTC 15 серпня 2010 року.

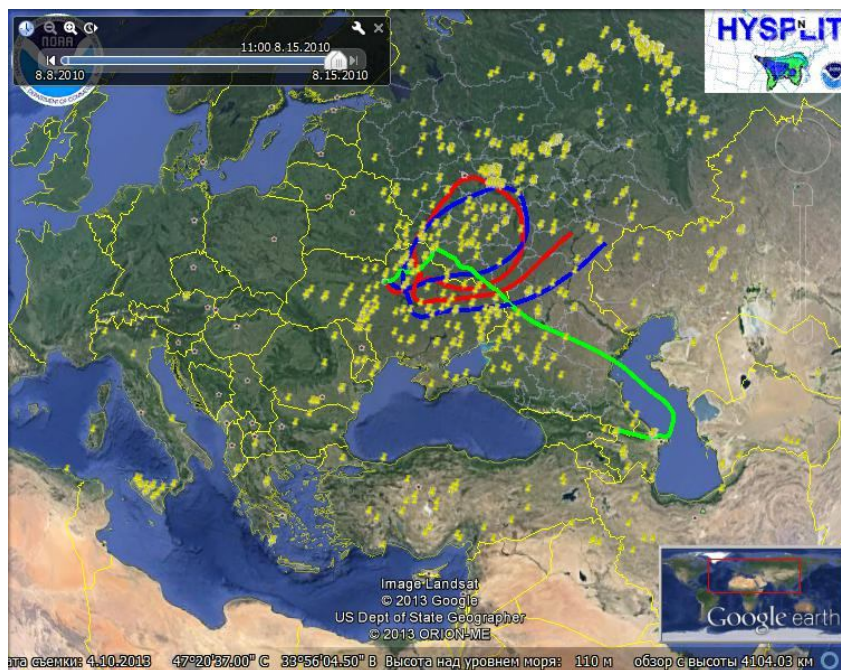


Рис. 5. Локалізація пожеж та траєкторії повітряних потоків на висотах 500 м(червоний), 1500 м(синій) та 3000м (зелений) 15 серпня 2010 року.

Кількісну оцінку внеску цього аерозолію у забруднення атмосфери над Києвом протягом серпня 2010 р. можна одержати припускаючи, що без цього чинника AOD на цей період була б приблизно такою ж, як у інші роки. Середньомісячне значення AOD(440 нм) для серпня, усереднене протягом 2008 – 2012 рр. (без 2010 р.) становить приблизно 0.31, тоді як у 2010 р. 0.45, тобто додаткове збільшення становить приблизно 0.14, або 45% до середнього рівня.

## Підсумки

Отже, засоби AERONET надають можливість для ефективних досліджень забруднення атмосфери аерозолями різного походження як у регіональному, так і у глобальному масштабах, звісно, за сприятливих погодних умов. Однак накопичення цих даних протягом тривалого часу у місці спостережень дозволяє робити висновки як про рівень забруднення, так і про особливості його динаміки, наприклад сезонні зміни. Застосування сучасних методів побудови траєкторій переміщення атмосферних мас на основі великого числа доволі точних вимірювань метеорологічних параметрів атмосфери та інтегрування рівнянь руху повітряних мас, зокрема моделі HYSPLIT, разом з супутниковими засобами спостереження за земною поверхнею і атмосферою дозволяють виявляти джерела надходження аерозолу у атмосферу, стежити за його динамікою і оцінювати кількісно внесок у забруднення над окремими місцевостями.

Аналіз даних вимірювань з сонячним фотометром AERONET та траєкторій переміщення повітряних мас дозволив достовірно виявити джерело підвищеного забруднення атмосфери над Києвом аерозольними частинками у серпні 2010 р. та кількісно оцінити його. Надходження диму та інших аерозолів від джерел стихійних лісових пожеж збільшило оптичну товщу аерозолу приблизно на 45% від середнього значення для цього періоду року. Детальніші дослідження аерозольного забруднення атмосфери можуть бути спрямовані на виявлення і оцінювання ефективності як джерел надходження аерозолів у атмосферу, так і механізмів їхнього видалення, а також на оцінювання його кліматичних ефектів.

## Література

1. Бовчалуєк А. П. Вплив пожеж на розподіл аерозолу над Україною за даними супутникових та наземних вимірювань / А. П. Бовчалуєк // *Космічна наука і технологія*. 2013. Т. 19. № 5. С. 27–41.;
2. Ван де Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами (пер. с англ.) Ван де Хюлст Г. – М.: Изд. Иностран. Лит., 1961. – 536 с.;
3. Динамика атмосферного аэрозоля по измерениям с солнечным фотометром и со спутника над Украиной для исследований изменений климата / В. А. Данилевский, Г. П. Милиневский, М. Г. Сосонкин, и др. // *Глобальные и региональные изменения климата* / [Шестопалов В.М., Логинов В.Ф., Осадчий В.И. и др.]. - Киев: Ника-Центр, 2011. - 448 с. - С. 122-134.;
4. Исследование путей переноса атмосферных аэрозолей в Белорусско-Украинском регионе по данным сети AERONET методом кластерного анализа / В. П. Кабашников, А. А. Акулинин, В. А. Данилевский, и др. // *Наукові праці УкрНДГМІ*. – 2012. – Вип. 262. – С. 40 – 58.;
5. Определение районов источников аэрозолей, поступающих в центральную часть Украины, методом статистики обратных траекторий / В. П. Кабашников, Г. П. Милиневский, А. П. Бовчалуєк, В. А. Данилевский // *Вісник астрономічної школи*. – 2013. – Т. 9. – № 1–2. – С. 149 – 154.;
6. Variability of aerosol properties over Eastern Europe observed from ground and satellites in the period from 2003 to 2011 / A. Bovchaliuk, G. Milinevsky, V. Danylevsky, et al // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2013. – V. 13. – P. 6587–6602.;
7. Input Data Requirements Lagrangian Trajectory Models / K. P. Bowman, J. C. Lin, A. Stohl, et al // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* – 2013. – V. 94. – P. 1051–1058.;
8. Chin M. Atmospheric aerosol properties and climate impacts / M. Chin, R.A. Kahn, S. E. Schwartz (Eds). – Washington: U.S. Climate Change Science Program, 2009. – 128.;
9. Smoke aerosol and its radiative effects during extreme fire event over Central Russia in summer 2010 / N. Chubarova, Ye. Nezval', I. Sviridenkov, et al // *Atmospheric Measurement Techniques*. – 2012. – V. 5. – P. 557–568.;
10. Aerosol layer properties over Kyiv from AERONET/PHOTONS sunphotometer measurements during 2008–2009 / V. Danylevsky, V. Ivchenko, G. Milinevsky et al // *International Journal of Remote Sensing*. – 2011. – V. 32, No.3. – P. 657 – 669.;
11. Atmospheric Aerosol Properties Measured with AERONET/PHOTONS Sun-Photometer over Kyiv during 2008-2009 / V. Danylevsky, V. Ivchenko, G. Milinevsky, et al // In: *Use of Satellite and In-Situ Data to Improve Sustainability* (Eds. F. Kogan, A. Powell and O. Fedorov). NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. – Springer Science+Business Media B.V., 2011. – P. 285 – 294.;
12. Draxler, R. R., Hess G. D. An overview of the HYSPLITp4 modeling system for trajectories, dispersion, and deposition. *Australian Meteorological Magazine*. – 1998. – V. 47. – P. 295 – 308.;
13. Dubovik O. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements / O. Dubovik, M. King // *Journal of Geophysical Research*. - 2000. – Vol. 105. – P. 20673-20696.;
14. Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from Aerosol Robotic Network (AERONET) Sun and sky radiance measurements / O. Dubovik, A. Smirnov, B. N. Holben, et al // *Journal of Geophysical Research*. – 2000. – Vol. 105. – P. 9791–9806.;
15. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing / P. Forster, V. Ramaswamy, P. Artaxo, et al // In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007. – P. 129 – 234.;
16. AERONET - a federated instrument network and data archive for aerosol characterization / B. N. Holben, T. F. Eck, I. Slutsker, et al // *Remote Sensing of Environment*. – 1998. – V. 66. – P. 1 – 16.;

17. Kokhanovsky A. A. Aerosol optics. Light absorption and scattering by particles in the atmosphere / Kokhanovsky A. A. – Springer and Praxis Publishing, 2008. – 146p;
18. Atmospheric impacts of the 2010 Russian wildfires: integrating modelling and measurements of an extreme air pollution episode in the Moscow region / I. B. Konovalov, M. Beekmann, I. N. Kuznetsova, et al // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2011. – V. 11. – P. 10031–10056;
19. Aerosols, their direct and indirect effects / J. E. Penner, M. Andreae, H. Annegarn, et al // In: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. – Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 2001. – P. 289 – 348;
20. Direct radiative effect of the Russian wildfires and their impact on air temperature and atmospheric dynamics during August 2010 / J. C. Pere, B. Bessagnet, M. Mallet, et al // Atmospheric Chemistry and Physics Discussions. – 2013. – V. 13. – P. 15829–15866;
21. Stohl A. Computation, accuracy and applications of trajectories – a review and bibliography / Stohl A. // Atmospheric Environment, 1998, Vol. 32, No. 6, pp. 947 – 966;
22. Stohl A. Trajectory statistics – a new method to establish source-receptor relationship of air pollutants and its applications to the transport of particulate sulfate in Europe / Stohl A. // Atmospheric Environment. - 1996. - V. 30, - No.4. - P. 579–587;
23. NASA A-Train and Terra observations of the 2010 Russian wildfires / J. C. Witte, A. R. Douglass, A. da Silva, et al // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2011. – V. 11. – P. 9287–9301

**Аннотация** Е. И. Галицкая, В. А. Данилевский, С. И. Снежко **Состояние загрязнения аэрозолями атмосферы над Киевом по дистанционным исследованиям средствами AERONET и влияние на него лесных пожаров летом 2010 г.** Аэрозоли в земной атмосфере являются не только загрязнителями воздуха, но и фактором, влияющим на формирование климата. Исследование динамики аэрозольного слоя, свойств аэрозольных частиц, выявление источников их поступления в атмосферу является одной из актуальных задач современной метеорологии, климатологии, физики атмосферы, экологии. Для этих исследований применяются методы дистанционных наземных и спутниковых измерений оптических свойств аэрозольных частиц, а также исследования динамики атмосферы и моделирования процессов переноса частиц.

В работе по данным исследований аэрозолей средствами AERONET и методом построения обратных траекторий движения воздушных масс был определен уровень загрязнения аэрозолями атмосферы над Киевом в течение 2008 - 2013 гг., выявлены пути их поступления и оценен вклад от стихийных лесных пожаров в августе 2010 г. За время наблюдений ежемесячно усредненная оптическая толщина аэрозольного слоя над Киевом при длине волны оптического излучения 440 нм находилась в пределах 0.05 - 0.45, тогда как на коротких промежутках времени она менялась в значительно более широком диапазоне. Так, 15 августа 2010 г. эта величина достигала значения 1.5, что было связано с поступлением аэрозолей от стихийных лесных пожаров в России летом того года. Всего среднемесячное значение оптической толщины в августе 2010 г. над Киевом превышало среднее для этого месяца за весь период наблюдений примерно на 45%.

**Ключевые слова:** аэрозоли, AOD, AERONET, солнечный фотометр, обратные траектории, HYSPLIT

**Abstract.** E. Galytska, V. Danylevsky, S. Snizhko **State of aerosol pollution of the atmosphere over Kyiv by means of remote studies AERONET and the impact of forest fires in the summer of 2010.** Aerosols in the Earth's atmosphere are not only air pollutants but also a factor that affects the climate. The study of the dynamics of aerosol layer properties of aerosol particles, revealing their sources in the atmosphere is one of the urgent problems of modern meteorology, climatology, atmospheric physics, ecology. For these studies used methods of remote land-based and satellite measurements of the optical properties of aerosol particles and atmospheric dynamics research and modeling of transport of particles.

The level of aerosols pollution over Kyiv during 2008 - 2013 was determined according to aerosols research by AERONET means and methods of reverse trajectories of air masses. As well, the ways of their transfer were submitted and rated by the contribution from natural forest fires in August 2010. During the month of observation averaged aerosol optical thickness of the layer of Kyiv at a wavelength of 440 nm optical radiation was within 0.05 - 0.45, while in the shortest time it has changed to a much wider range.

Thus, 15 August 2010, the value reached 1.5, which was associated with the receipt of aerosols from natural forest fires in the summer of that year. Overall, monthly average optical depth in August 2010 on Kyiv exceeded the average for that month for the entire period of observation for about 45%.

**Keywords:** aerosols, AOD, AERONET, sun photometer, back trajectories, HYSPLIT

Поступила в редакцию 23.01.2014 г.