

**В. Бовчалюк¹, Г. Міліневський^{1,2}, В. Данилевський¹,
Ф. Голуб³, М. Сосонкін², Ю. Юхимчук¹, Т. Подвін³**

¹ Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

² Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ, Україна

³ Лабораторія оптики атмосфери Університету Лілля1, Лілля, Франція

ВЛАСТИВОСТІ АЕРОЗОЛЮ В АТМОСФЕРІ НАД КИЄВОМ ЗА ЛІДАРНИМИ ТА ФОТОМЕТРИЧНИМИ СПОСТЕРЕЖЕННЯМИ

Приводяться результати аналізу оптичних та мікрофізичних властивостей аерозольних частинок та їхнього розподілу в атмосфері над Києвом на початку вересня 2015 р. за даними лідарних та фотометричних спостережень перед та під час забруднення атмосфери внаслідок лісових та торфових пожеж. Спостереження були виконані за допомогою лідара CIMEL370 та сонячного фотометра станції Київ мережі AERONET, розташованих у Головній астрономічній обсерваторії НАН України в Києві. Для аналізу даних використовувався нещодавно розроблений алгоритм GARRLiC. Встановлено, що на початку події, 1-го та 2-го вересня, в атмосфері над Києвом спостерігався типовий стан атмосфери з незначним вмістом аерозолію, а з вечора 2 вересня у Київ з північно-північно-західного напрямку надійшла велика кількість продуктів горіння, що спричинило підвищення вмісту аерозолію в декілька разів. При цьому вперше в Україні за даними лідарних спостережень відтворено характеристики аерозолію в залежності від висоти над поверхнею. Проведено порівняння характеристик аерозолію з відповідними значеннями, отриманими за алгоритмом AERONET.

Ключові слова: аерозоль, властивості аерозолію, висотний розподіл аерозолію, лідарні спостереження, фотометричні спостереження, лісові та торф'яні пожежі.

ВСТУП

Вплив аерозолію на баланс енергії у земній атмосфері широко визнаний як один з найістотніших і найменш відомих аспектів змін клімату [23]. Регіональні проблеми, пов'язані з аерозолями, включають вплив на навколишнє середовище (наприклад, погіршення видимості) а також потенційний вплив на здоров'я людини. Так, наприклад, під час події, що аналізується нижче, для запобігання негативного впливу на здоров'я людей було вжито запобіжних заходів,

зокрема було відмінено навчання в освітніх закладах та дитячих садках.

Головні джерела аерозолів включають міські/індустріальні викиди, дим від горіння біомаси, вторинне утворення аерозолію від аерозольних прекурсорів (мінливі компоненти атмосфери, з яких утворюються аерозолі внаслідок хімічних реакцій), морську сіль і пил. Для спостережень та моніторингу вмісту, розподілу та оптичних і мікрофізичних характеристик аерозолів у земній атмосфері використовуються наземні та супутникові засоби спостережень [6]. Ці методи взаємно доповнюють один одного. Наземні засоби, що дозволяють визначати характеристики

аерозольних частинок зі значно вищою достовірністю, ніж супутникові, використовуються як засіб підтвердження результатів останніх.

Зокрема, для підтвердження майбутніх результатів космічного проекту «Aerosol-UA» з досліджень аерозолів у земній атмосфері [1, 20] передбачається використання результатів наземних вимірювань за допомогою сонячних фотометрів міжнародної мережі AERONET (Aerosol Robotic Network, <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>) [11] а також мережі лідарів — приладів, що забезпечують дані про вертикальний розподіл аерозольних частинок у атмосфері. Однією з таких мереж є європейська мережа EARLINET (European Aerosol Research Lidar Network, www.earlinet.org), що охоплює приблизно 30 лідарних станцій у різних країнах Європи.

Проте зазначені наземні інструменти є також самодостатніми ефективними засобами досліджень аерозолів у земній атмосфері, особливо ефективними є одночасні вимірювання за допомогою сонячних фотометрів та лідарів. Результати таких досліджень, уперше виконаних в Україні, аналізуються нижче.

Дослідження характеристик аерозолію у атмосфері над Києвом за допомогою сонячного фотометра мережі AERONET, розташованого на території Головної астрономічної обсерваторії НАН України (ГАО) проводяться з 2008 р. [2—4, 18, 19]. Протягом липня — вересня 2015 р. тут також були проведені спостереження висотного розподілу аерозолію за допомогою однохвильового лідара CIMEL370, що був наданий Лабораторією оптики атмосфери Університету Лілль1. Даний лідар складається із «зеленого» лазера, телескопа і приймальної системи світлового випромінювання. Лідар надсилає світлові імпульси на довжині хвилі $\lambda = 532$ нм вертикально вгору. Це світло розсіюється атмосферними молекулами та аерозольними частинками (дим, сажа, пил, піщинки) і реєструється телескопом з чутливим приймачем. За цими вимірюваннями розраховується висота та потужність аерозольного шару, його динаміка та розподіл по висоті. Також, як буде показано нижче, лідарні спостереження разом зі спостереженнями сонячного фотометра можуть використовуватися для від-

творення оптичних та мікрофізичних властивостей аерозолію.

Дані сонячного фотометра використовуються для відтворення оптичних та мікрофізичних властивостей аерозолію за допомогою алгоритму AERONET. Детальний огляд алгоритму та методів аналізу вимірювань параметрів аерозолію, зокрема над територією України, можна знайти у публікаціях [2, 4, 5, 10, 11, 18, 19]. Нижче ми наводимо методи обробки лідарних вимірювань та результати аналізу одночасних лідарних та фотометричних спостережень під час надзвичайної задимленості атмосфери над Києвом протягом вересня 2015 р.

ЛІДАРНЕ РІВНЯННЯ ТА МЕТОДИ, ЩО ЗАСТОСОВУЮТЬСЯ ДЛЯ АНАЛІЗУ ЛІДАРНИХ ДАНИХ

В найпростішій формі, рівняння, яке описує лідарні спостереження, можна записати у такому вигляді:

$$P(R) = K \cdot G(R) \beta(R) T(R) + P_{bg}, \quad (1)$$

де $P(R)$ — інтенсивність випромінювання на відстані R , виміряна детектором модуля реєстрації, K — коефіцієнт, що описує інструментальну ефективність лідара, $G(R)$ — коефіцієнт, що описує геометрію спостережень (залежить від взаємної орієнтації лазерного пучка та поля зору телескопа лідара), $\beta(R)$ — коефіцієнт зворотного розсіяння атмосфери, $T(R)$ — коефіцієнт прозорості атмосфери, P_{bg} — інтенсивність фонового випромінювання, виміряна детектором модуля реєстрації. Коефіцієнти K та $G(R)$ залежать від конструкції лідарної системи та є калібрувальними параметрами системи, а величини $\beta(R)$ та $T(R)$ повинні бути визначені зі спостережень.

Виміряний сигнал $P(R)$ завжди включає в себе фонове випромінювання P_{bg} , що складається з розсіяного на молекулах та аерозольних частинках прямого сонячного і відбитого від земної поверхні випромінювання, яке потрапило в поле зору лідара. Цей фоновий сигнал не залежить від висоти і може бути легко визначений зі спостережень. Усереднене значення виміряного сигналу від дуже далекого діапазону висот, де вже не очікується зворотного розсіяння лідарного випромінювання від частинок та молекул, є фоновим значенням.

Інструментальний коефіцієнт K може бути записаний у такому вигляді:

$$K = P_0 \frac{c\tau}{2} A\eta, \quad (2)$$

де P_0 — потужність лазерного пучка, τ — часова тривалість пучка, $c\tau/2$ — висота об'єму середовища, з якого реєструється зворотне розсіяння у певний момент часу, A — площа вхідної апертури телескопа, η — коефіцієнт ефективності системи, що включає в себе ефективність проходження світлового пучка через усі оптичні системи лідара та ефективність реєстрації детекторів.

Геометричний коефіцієнт $G(R)$ пов'язаний з функцією перекриття та відстанню від телескопа R^2 :

$$G(R) = \frac{O(R)}{R^2}. \quad (3)$$

Функція перекриття $O(R)$ є характеристикою дивергенції лазерного пучка та поля зору телескопа. Вона збільшується від нуля на відстані біля телескопа до одиниці на відстані повного перекриття лазерного пучка з полем зору телескопа та всіх його оптичних частин. Квадратичне зменшення ($\propto R^{-2}$) інтенсивності розсіяного назад світла пов'язане з тим, що площа телескопа є частиною площі сфери з радіусом R , у межах якої відбувається розсіяння.

Коефіцієнт зворотного розсіяння $\beta(R)$ є атмосферним параметром, що визначає інтенсивність розсіяного у зворотному напрямі світла частинками та молекулами атмосфери. Цей коефіцієнт залежить від типу, розміру частинок та довжини хвилі світла і може бути виражений через концентрацію частинок ($N_j(R)$, де j — тип частинки чи молекули) і їхнього диференційного перерізу розсіювання $d\sigma_j^{sca,cs}(\pi, \lambda)/d\Omega$, де $\sigma_j^{sca,cs}$ — поперечний переріз розсіяння, Ω — тілесний кут) у зворотному напрямі при довжині хвилі λ :

$$\beta(R, \lambda) = \sum N_j(R) \frac{d\sigma_j^{sca,cs}(\pi, \lambda)}{d\Omega}. \quad (4)$$

Через те що даний коефіцієнт залежить від типу частинок, його доцільно розділити на молекулярну та аерозольну складові: $\beta = \beta_{mol} + \beta_{aer}$. Молекулярна складова коефіцієнта зворотного розсіювання може бути досить точно визначена

за метеорологічними даними з використанням стандартної моделі атмосфери [14].

Коефіцієнт прозорості атмосфери описує енергетичні втрати лазерного пучка світла на шляху до об'єму атмосфери на відстані R від лідара та назад до телескопа:

$$T(R, \lambda) = \exp\left[-2\int \sigma^{ext}(r, \lambda) dr\right]. \quad (5)$$

Цей коефіцієнт впливає з закону Ламберта — Бугера — Бера для лідарів [24]. Інтеграл включає в себе відстань R від лідара до точки, де відбувається зворотне розсіяння, множник 2 з'являється тому, що світловий пучок проходить дану відстань двічі: від телескопа до місця розсіяння та назад до телескопа. Коефіцієнт екстинкції σ^{ext} може бути представлений у формі, схожій до форми коефіцієнта зворотного розсіяння:

$$\sigma^{ext}(R, \lambda) = \sum N_j(R) \sigma_j^{ext,cs}(\lambda). \quad (6)$$

Даний коефіцієнт включає в себе доданки, що відповідають за розсіяння та поглинання світла молекулами і аерозолями в атмосфері Землі:

$$\sigma^{ext} = \sigma_{mol}^{abs} + \sigma_{mol}^{sca} + \sigma_{aer}^{abs} + \sigma_{aer}^{sca}. \quad (7)$$

Довжини хвиль в лідарах вибираються так, щоб мінімізувати молекулярне поглинання. Молекулярне розсіяння можна визначити за стандартною моделлю атмосфери [14]. Коефіцієнти аерозольного поглинання та розсіяння, що складають аерозольну екстинкцію, невідомі і визначаються зі спостережень.

З урахуванням викладеного вище лідарне рівняння можна записати у такому вигляді:

$$P(R, \lambda) = P_0 \frac{c\Delta\tau}{2} A\eta \frac{O(R)}{R^2} \beta(R, \lambda) \exp\left[-2\int \sigma^{ext}(r, \lambda) dr\right]. \quad (8)$$

Рівняння включає два невідомих параметри: коефіцієнт аерозольної екстинкції $\sigma^{ext}(R, \lambda)$ та коефіцієнт зворотного розсіяння аерозолів $\beta(R, \lambda)$. Параметри атмосфери, від яких залежать коефіцієнти екстинкції та зворотного розсіяння, можуть бути визначені зі стандартної моделі атмосфери або ними можна знехтувати за відповідних умов (наприклад, якщо у вибраній довжині хвилі лазерного випромінювання не відбувається поглинання світла молекулами атмосфери). Таким чином, аналітичний розв'язок даного рів-

няння не може бути знайдений, або, як це вперше було запропоновано Джеймсом Клеттом [12, 13, 21], знайдений за умови взаємозалежності між коефіцієнтами екстинкції та зворотного розсіяння аерозолів (метод Клетта). Відношення коефіцієнтів екстинкції та зворотного розсіяння називають лідарним відношенням, рівняння для якого можна записати у вигляді:

$$LR_{aer}(R, \lambda) = \frac{\sigma_{aer}(R, \lambda)}{\beta_{aer}(R, \lambda)} \quad (9)$$

В загальному випадку лідарне відношення змінюється з висотою, бо коефіцієнти екстинкції та зворотного розсіяння залежать від типу, розміру та форми частинок, що змінюються з висотою. У методі Клетта лідарне відношення вважається незмінним з висотою, і тоді рівняння (8) може бути розв'язане ітераційним методом відносно коефіцієнта зворотного розсіяння.

Припущення про стале лідарне відношення на усіх висотах збільшує похибку визначення профілів екстинкції та зворотного розсіяння. Для зменшення похибок визначення профілю аерозольної екстинкції необхідні додаткові спостереження (наприклад, з сонячними фотометрами) та/чи додаткові обмеження на припущення. Сонячні фотометри міжнародної мережі AERONET здійснюють вимірювання спектральної оптичної товщини аерозолів у стовпі атмосфери над місцем спостережень. Ці спостереження слугують додатковими до лідарних, якщо вони виконуються одночасно з лідарними у тому ж спостережному пункті. Для аналізу таких одночасних спостережень сонячного фотометра та лідара може використовуватися алгоритм GARRLiC (Generalized Aerosol Retrieval from Radiometer and LIDAR Combined data) [17], що є частиною більш загального алгоритму GRASP (Generalized Retrieval of Atmosphere and Surface Properties, <http://www.grasp-sas.com/>) [8, 10]. Даний алгоритм був розроблений в лабораторії оптики атмосфери CNRS/Lille1 (LOA) [5, 16, 17].

Алгоритм GARRLiC включає в себе одночасне моделювання спостережних даних сонячних фотометрів та лідарів (загальна схема моделювання представлена на рис. 1). Алгоритм є дуже гнучким, може відтворювати та аналізувати дані однохвильового та багатохвильового лідарного

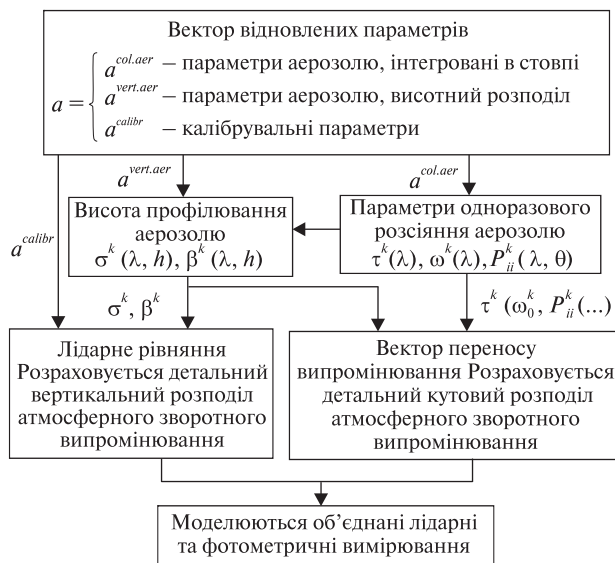


Рис. 1. Загальна схема моделювання спостережних даних лідара та сонячного фотометра (дані [17])

інструмента. При аналізі багатохвильових даних може використовуватися модель як двомодального аерозольного шару (фракції частинок 0.1... 1 мкм та 1...15 мкм) так і одномодального (без розділення на фракції). При моделюванні атмосфери з двомодальним розподілом аерозолів за розміром для розділення внеску дрібнодисперсної та крупнодисперсної фракції використовується вимірювання у декількох спектральних каналах. При однохвильових вимірюваннях (спостереження такого типу лідара аналізуються тут) можна відтворити вертикальний розподіл лише для одномодального розподілу частинок за розмірами. Параметри аерозолію, які можна відтворити за допомогою даного алгоритму, включають розподіл по розмірах, ефективний радіус частинок, аерозольну оптичну товщину, альbedo одноразового розсіяння, комплексний показник заломлення, фазову функцію, лідарне відношення, вертикальний розподіл концентрації частинок, вертикальний розподіл коефіцієнтів екстинкції та зворотного розсіяння. Детальний опис алгоритму наведено в роботах [5, 16, 17].

Вектор відновлених параметрів складається з параметрів аерозолію (інтегровані у стовпі та їхній вертикальний розподіл) та калібрувальний параметр лідара (добуток інструментальної ефективності лідара та його геометрії спостережень). У параметри,

що змінюються з висотою, входять коефіцієнт екстинкції σ^k та коефіцієнт зворотного розсіяння β^k , а аерозольна оптична товщина τ^k , коефіцієнт одно-разового розсіяння ω_0^k та фазова функція $P_{\#}^k$ є інтегральними параметрами по висоті. Використовуючи лідарне рівняння та модель переносу енергії в атмосфері, за допомогою алгоритму GARRLiC одночасно моделюються лідарні спостереження та спостереження сонячного фотометра.

Ми аналізуємо події задимленості від пожеж, тому варто навести середні значення оптичних та мікрофізичних параметрів аерозолію схожого типу, отриманих під час пожеж в інших районах планети. У відповідності до результатів дослідження [9] за вимірюваннями з сонячними фотометрами мережі AERONET основні оптичні властивості частинок — продуктів горіння біомаси — змінюються в залежності від району пожеж. Наприклад, частинки продуктів горіння біомаси в лісах Амазонки, мають такі властивості: а) показник Ангстрема (AE), який характеризує розмір частинок, змінюється від 1.2 до 2.1 для пари довжин хвиль 440 та 870 нм, б) дійсна частина показника заломлення стала для всіх довжин хвиль (440/670/870/1020 нм) і складає $RRI = 1.47 \pm 0.03$; уявна частина показника заломлення $IRI = 0.00093 \pm 0.003$, в) альbedo одно-разового розсіяння зменшується зі збільшенням довжини хвилі: $SSA(440/670/870/1020 \text{ нм}) = 0.94/0.93/0.91/0.90 \pm 0.02$.

Аерозольні частинки в атмосфері над саваною в Африці мають такі властивості: а) AE змінюється від 1.4 до 2.2, б) $RRI = 1.51 \pm 0.01$, $IRI = 0.021 \pm 0.004$, в) $SSA(440/670/870/1020 \text{ нм}) = 0.88/0.84/0.80/0.78 \pm 0.015$.

Лідарне відношення менш поглинаючих міських аерозолів змінюється у межах 35...70 ср, тоді як для частинок — продуктів горіння біомаси — величина LR має більші значення (70...100 ср) на довжині хвилі 532 нм [24]. Також спостерігається залежність лідарного відношення від часу життя в атмосфері продуктів горіння. Враховуючи, що середній час життя цих частинок складає 6.5 діб [15], то за часом життя їх можна розділити на «свіжі» (до доби), «середні» (1—2 доби) та «старі» (більше 2—3 діб). Для частинок, що перебувають в атмосфері більше доби, лідарне відно-

шення зростає [22]. Дійсна частина комплексного показника заломлення не змінюється з часом, тоді як його уявна частина суттєво зменшується протягом першої половини доби від надходження частинок в атмосферу. Також альbedo одно-разового розсіяння збільшується протягом першої доби у відповідності до змін уявної частини комплексного показника заломлення [22].

Крім спостережних лідарних та фотометричних даних у статті використовуються результати обчислень зворотних траєкторій руху повітряних мас, що переміщувалися до Києва протягом зазначеного періоду. Ці траєкторії обчислено за допомогою моделі HYSPLIT [7].

АНАЛІЗ ЛІДАРНИХ ТА ФОТОМЕТРИЧНИХ ДАНИХ

Протягом 1—6 вересня 2015 р. у м. Києві спостерігалася значна задимленість атмосфери (рис. 2). Вранці 3 вересня було важко дихати, було відмінено навчання в загальноосвітніх закладах та дитячих садках. Задимленість була спричинена стихійними пожежами лісу поблизу Києва, а також завдяки переносу повітряних мас з північно-західних областей України (рис. 3), де також відбувалися значна кількість лісових та торф'яних пожеж (рис. 4). За даними Державної служби надзвичайних ситуацій (ДСНС) пожежа лісового покриву поблизу сіл Коблиця та Великий Ліс (у північно-північно-західному напрямі від Києва) тривала протягом 1—4 вересня 2015 р. і охопила 24 га. Протягом 2—4 вересня відбувалась пожежа

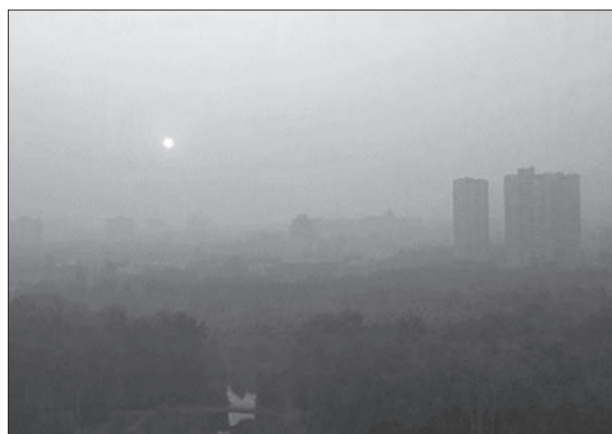


Рис. 2. Ранок (8:00) 3 вересня 2015 р. (www.dnews.ua)

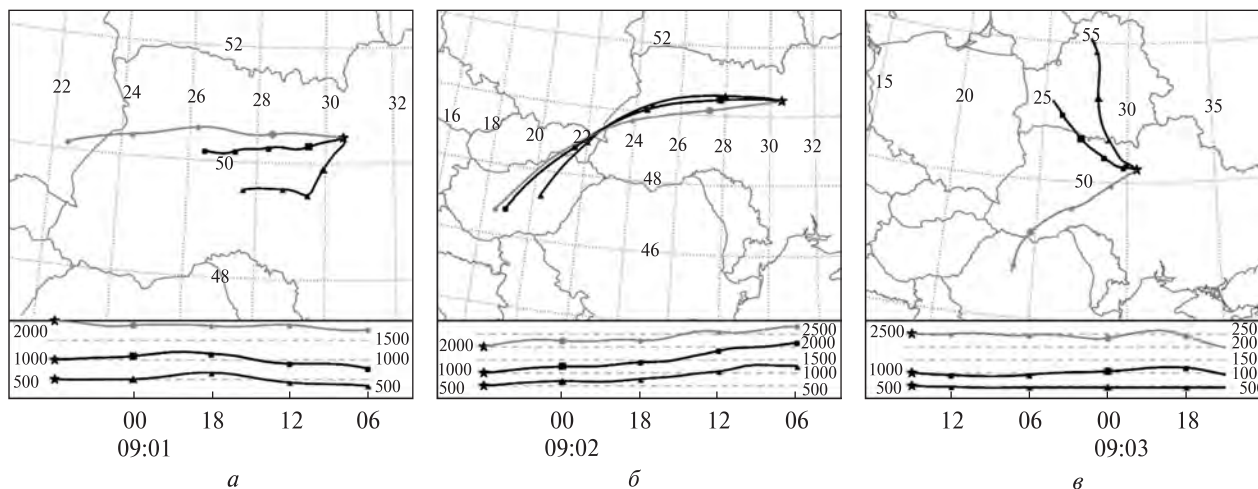


Рис. 3. Зворотні траєкторії повітряних мас: а — 1 вересня 06:00 UT, б — 2 вересня 06:00 UT; в — 3 вересня 15:00 UT

на території Білодубравного лісництва Дарницького лісопаркового господарства (у північно-східній частині Києва), пожежа охопила 32 га. Спираючись на зворотні траєкторії повітряних мас (рис. 3), карти лісових пожеж (рис. 4) та повідомлення ДСНС, можна зробити попередній висновок, що задимленість у перший період інтенсивних пожеж (1—2 вересня) була малою (не була видна неозброєним оком) через надходження північно-західних повітряних мас, а задимленість 3 вересня була спричинена торф'яними пожежами поблизу сіл Коблиця та Великий Ліс і спостерігалася неозброєним оком (рис. 2). Зі зменшенням інтенсивності пожеж поблизу Києва зменшувалася задимленість міста.

Відповідно до одночасних вимірювань лідара та сонячного фотометра AERONET, подія задимленості може бути розділена на три періоди:

а) 1—2 вересня — типовий стан атмосфери для міста Києва з частинками продуктів горіння, які, можливо, були перенесені з північно-західних регіонів України [2]. Середнє аерозольне забруднення протягом дня: аерозольна оптична товщина на довжині хвилі 440 нм дорівнює $AOT \approx 0.4$; показник Ангстрема у парі довжин хвиль 440/870 нм $AE \approx 1.8$;

б) 3 вересня — подія з високим рівнем аерозольного забруднення (стихійна пожежа лісу поблизу Києва). Середнє аерозольне забруднення протягом дня: $AOT(440 \text{ нм}) \approx 0.8$, $AE \approx 1.8$,

після 3 вересня відбулися перші одночасні спостереження лідара та сонячного фотометра;

в) 7 вересня — атмосфера з низьким рівнем аерозольного забруднення (після дощу): $AOT(440 \text{ нм}) \approx 0.1$; $AE(440/870) \approx 1.6$. Для цього випадку дані лідарних вимірювань не аналізуються через низькі значення AOT оскільки за подібних низьких значень параметри аерозолію відтворюються зі значними похибками [8, 10].

Протягом 1—3 вересня було знайдено чотири періоди одночасних вимірювань лідара та сонячного фотометра, що аналізуються нижче.



Рис. 4. Пожежі (точки), зафіксовані протягом 1—3 вересня 2015 р. приладом MODIS (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>)

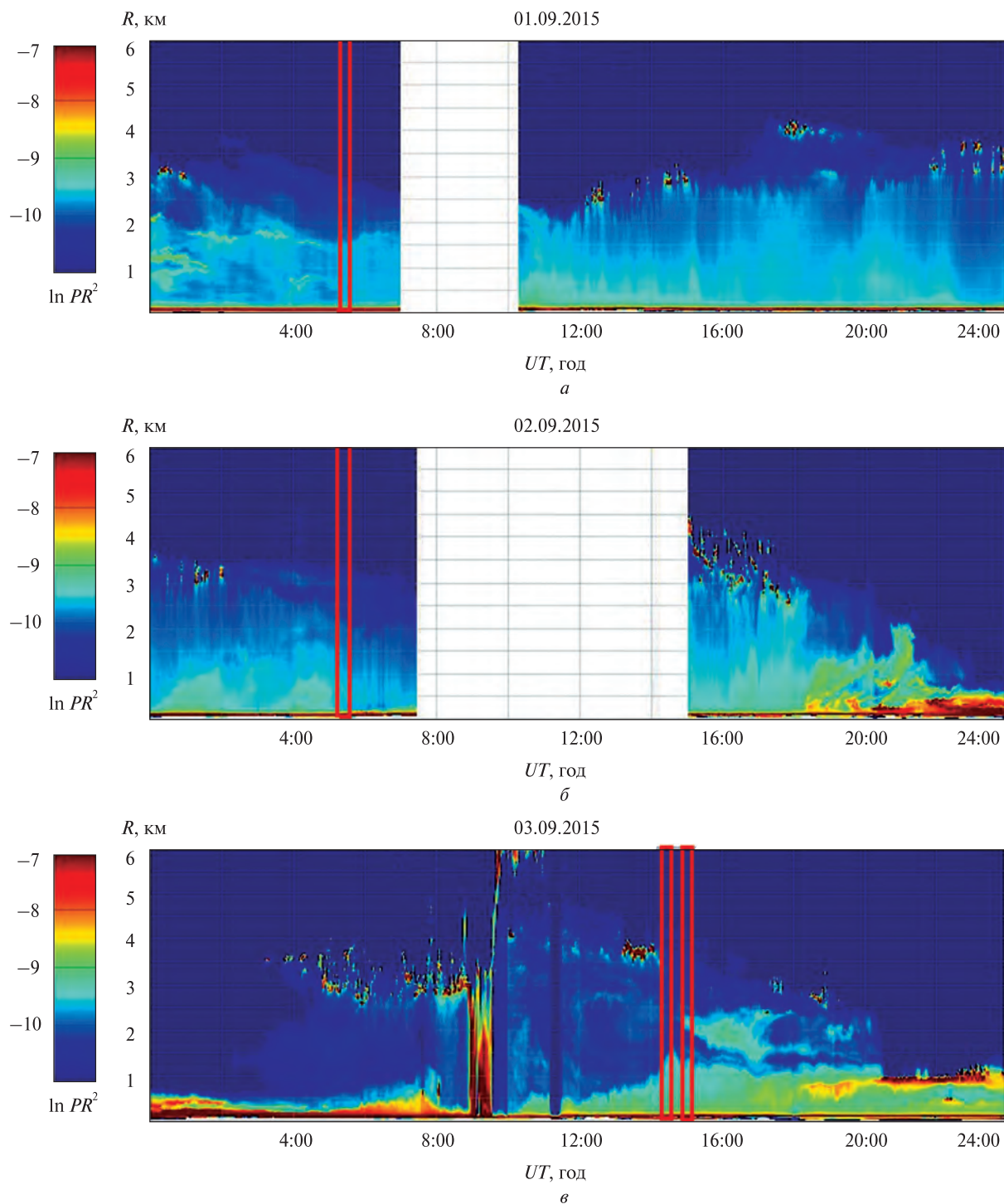


Рис. 5. Часово-висотний розподіл лідарного сигналу. Кольором показано натуральний логарифм відкоригованого по висоті ($\ln PR^2$, шкала зліва) лідарного сигналу, даний параметр часто використовується для візуалізації необроблених даних. Червоними стовпцями представлені моменти одночасних спостережень сонячного фотометра та лідара, що аналізуються у статті

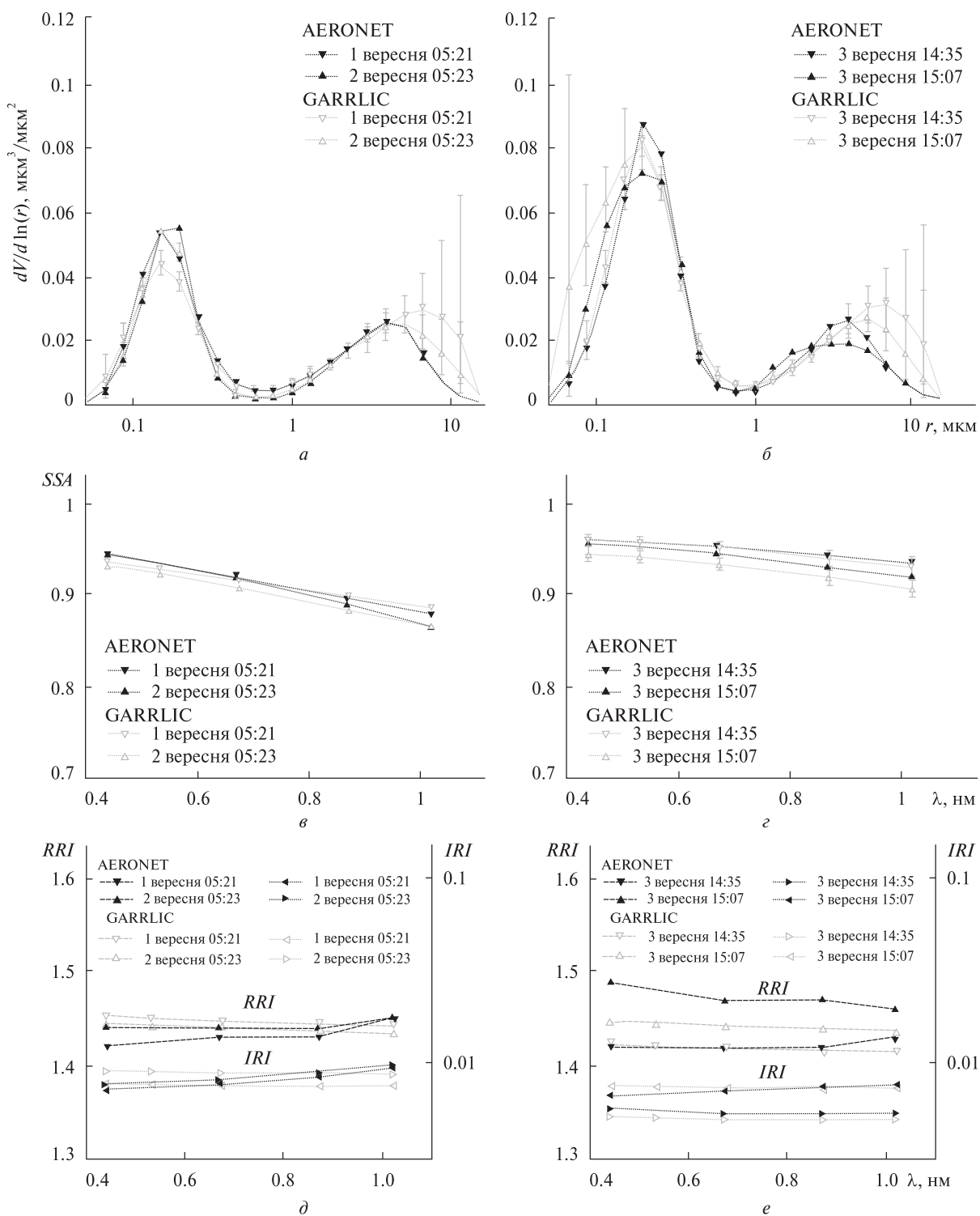


Рис. 6. Відтворені параметри аерозольних частинок за допомогою алгоритмів GARRLIC та AERONET до (а, в, д) та під час (б, г, е) інтенсивної події: а, б — розподіл частинок за розміром, в, г — спектральне альbedo одноразового розсіяння, д, е — спектральний комплексний показник заломлення (RRI — реальна частина показника, IRI — його уявна частина)

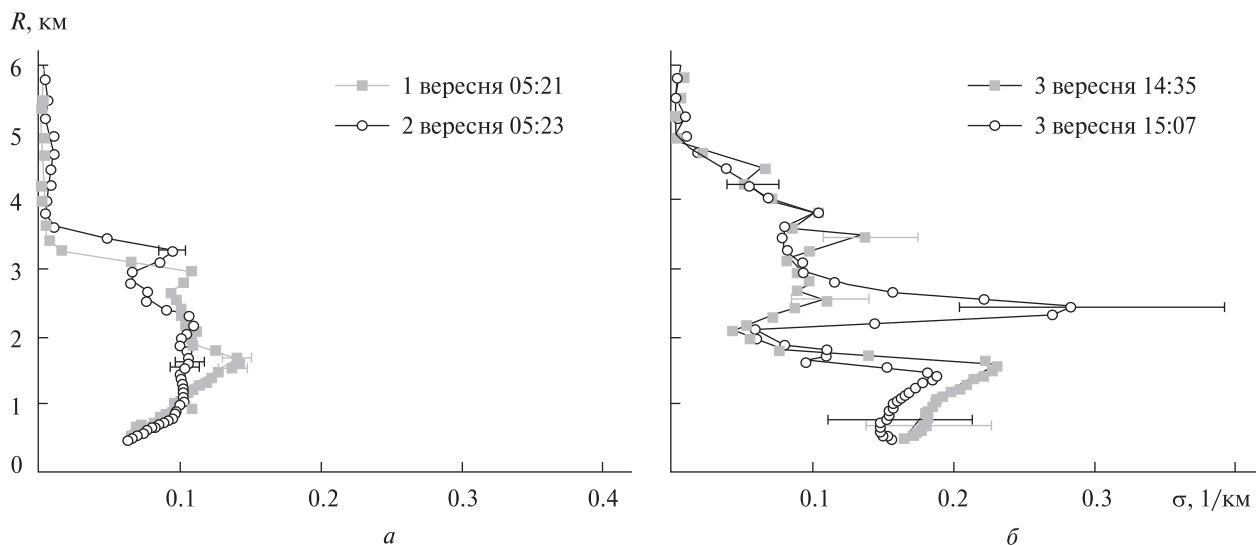


Рис. 7. Вертикальний розподіл коефіцієнта екстинкції, відтворений алгоритмом GARRLiC з одночасних вимірювань сонячного фотометра та лідара до (а) та під час (б) інтенсивної події

На рис. 5 представлено необроблений лідарний сигнал ($\ln PR^2$ — натуральний логарифм вимірюного сигналу, відкоригованого по висоті) за 1, 2 та 3 вересня відповідно; прямокутниками виділено одночасні вимірювання лідара та сонячного фотометра.

Відтворені оптичні та мікрофізичні властивості аерозолі за допомогою алгоритму GARRLiC представлено на рис. 6, де фрагменти *a*, *b* та *d* відповідають проаналізованам даним до події, *b*, *c* та *e* — під час події. На даних рисунках також представлені відтворені аерозольні параметри за алгоритмом AERONET (чорний колір), що використовує лише спостереження сонячних фотометрів [8, 10, 11].

Розподіл частинок по розмірах вказує на збільшення відносного вмісту дрібнодисперсної фракції аерозолі у атмосфері під час лісової пожежі біля Києва. Вміст частинок з розмірами у діапазоні 4...10 мкм за алгоритмом GARRLiC є вищим, ніж за алгоритмом AERONET. Це може бути спричинено додаванням лідарних даних у процес моделювання розсіяння світла за алгоритмом GARRLiC.

Ця властивість алгоритму потребує додаткового аналізу. Отримані значення величини *SSA* під час події у порівнянні з величинами попередньо-

го дня мають слабшу спектральну залежність. Однак усі значення *SSA* мають високі значення, які варіюють від 0.96 на $\lambda = 440$ нм до 0.86 на $\lambda = 1024$ нм. Значення *RRI* та *IRI*, отримані за допомогою алгоритму GARRLiC, є близькими до відтворених за алгоритмом AERONET і дорівнюють 1.45 ± 0.05 та 0.007 ± 0.003 відповідно. Лідарне відношення змінюється від 62 ср протягом 1 та 2 вересня до 72 ср протягом 3 вересня.

Протягом 1-го та 2-го вересня на висотах від 0.5 до 1 км над земною поверхнею спостерігалось збільшення коефіцієнта екстинкції від 0.05 до 0.1 км^{-1} , а на висотах від 1 до 4 км його середнє значення становило 0.1 км^{-1} і було розподілене однорідно (рис. 7). Під час задимленості в Києві висотний розподіл аерозолі змінювався. Як і до події, спостерігалось збільшення коефіцієнта екстинкції від 0.15 до 0.2 км^{-1} у висотних межах від 0.5 до 1.5 км, а вище, у межах від 2 до 5 км, спостерігалась незначна хмара аерозольних частинок із середнім значенням коефіцієнта 0.1 км^{-1} . Як видно з рис. 5, частинки горіння переміщувалися на незначних висотах і не підіймалися вище 5 км.

Таким чином, визначені оптичні та мікрофізичні властивості аерозолі вказують на наявність

у атмосфері над Києвом протягом 1—3 вересня 2015 р. суміші міських аерозолів та значної кількості частинок — продуктів горіння біомаси.

ВИСНОВКИ

Протягом липня — вересня 2015 р. вперше в Україні виконувалися лідарні спостереження висотного розподілу аерозолію. В даний період відбулась подія інтенсивної задимленості атмосфери над Києвом, спричинена лісовими пожежами у північно-північно-західному напрямі від міста. Аналізуються характеристики аерозолію до та під час події.

Для аналізу даних використовувався алгоритм GARLLiC, що одночасно моделює спостережні дані лідара та сонячного фотометра.

Було проаналізовано подію задимленості Києва протягом 1—3 вересня 2015 р. Показано, що на початку події (1—2 вересня) спостерігався типовий стан атмосфери Києва, а починаючи з пізнього вечора 2 вересня з північними та північно-західними вітрами в Київ надійшла велика кількість аерозольних частинок — продуктів горіння біомаси. Значення альбеда одноразового розсіяння аерозольних частинок під час події задимленості були вищі за подібні значення в інших точках планети, проте характерні для регіону у порівнянні зі значеннями, отриманими в роботі [22]. Відтворені параметри аерозолію за алгоритмом GARLLiC добре узгоджуються з відповідними параметрами, визначеними за алгоритмом AERONET і даними, представленими в роботі [22].

Роботу виконано за підтримки проекту PICS: CNRF (Франція) — НАН України, проекту 16БФ051-02 Київського національного університету імені Тараса Шевченка, теми «Аерозоль-УА» (NAS) Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2012—2017 рр., гранту Ф73/36-2017 Державного фонду фундаментальних досліджень. Автори вдячні за можливість використовувати лідар Лабораторії оптики атмосфери (ЛОА) Університету Ліль I (Франція) для спостережень в Україні. Для аналізу лідарних спостережень використано дані веб-сторінки ЛОА http://www-loa.univ-lille1.fr/Instruments/lidar/calendriers/newcal_2015_kiev.php.

ЛІТЕРАТУРА

1. Яцків Я. С., Мищенко М. И., Розенбуш В. К. Проект «АЭРОЗОЛЬ-УА»: дистанционное зондирование аэрозолей в земной атмосфере со спутника // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 4. — С. 3—15.
2. Яцків Я. С., Міліневський Г. П. Інформація про задимленість атмосфери в м. Києві // Вісник Нац. акад. наук України. — 2015. — № 10. — С. 25—30.
3. Bovchaliuk A., Milinevsky G., Danylevsky V., et al. Variability of aerosol properties over Eastern Europe observed from ground and satellites in the period from 2003 to 2011 // Atmos. Chem. Phys. — 2013. — **13**, N 13. — P. 6587—6602.
4. Bovchaliuk V., Bovchaliuk A., Milinevsky G., et al. Aerosol Microtops II sunphotometer observations over Ukraine // Adv. Astron. and Space Phys. — 2013. — **3**, N 1. — P. 46—52.
5. Bovchaliuk V., Goloub P., Podvin T., et al. Comparison of aerosol properties retrieved using GARRLiC, LIRIC, and Raman algorithms applied to multi-wavelength lidar and sun/sky-photometer data // Atmos. Meas. Techn. — 2016. — **9**, N 7. — P. 3391—3405.
6. Chin M., Diehl T., Tan Q., et al. Multi-decadal aerosol variations from 1980 to 2009: A perspective from observations and a global model // Atmos. Chem. Phys. — 2014. — **14**. — P. 3657—3690.
7. Draxler R. R., Hess G. D. An overview of the HYSPLIT_4 modelling system for trajectories // Austral. Meteorological Mag. — 1998. — **47**, N 4. — P. 295—308.
8. Dubovik O., Herman M., Holdak A., et al. Statistically optimized inversion algorithm for enhanced retrieval of aerosol properties from spectral multi-angle polarimetric satellite observations // Atmos. Meas. Techn. — 2011. — **4**, N 5. — P. 975—1018.
9. Dubovik O., Holben B., Eck T. F., et al. Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations // J. Atmos. Sci. — 2002. — **59**, N 3. — P. 590—608.
10. Dubovik O., King M. D. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements // J. Geophys. Res.: Atmospheres. — 2000. — **105D**, N 16. — P. 20673—20696.
11. Holben B. N., Eck T. F., Slutsker I., et al. AERONET — A federated instrument network and data archive for aerosol characterization // Remote Sens. Environ. — 1998. — **66**, N 1. — P. 1—16.
12. Klett J. D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns // Appl. Opt. — 1981. — **20**, N 2. — P. 211—220.
13. Klett J. D. Lidar inversion with variable backscatter/extinction ratios // Appl. Opt. — 1985. — **24**, N 11. — P. 1638—1643.
14. Krueger A. J., Minzner R. A. A mid-latitude ozone model for the 1976 US Standard Atmosphere // J. Geophys. Res. — 1976. — **81**, N 24. — P. 4477—4481.

15. Lenoble J., Remer L., Tanré D. (Eds). Aerosol remote sensing. — Berlin, Heidelberg: Springer, 2013. — 390 p.
 16. Lopatin A. Enhanced remote sensing of atmospheric aerosol by joint inversion of active and passive remote sensing observations: Doctoral dissertation. — Lille: Lille 1 University, 2013.
 17. Lopatin A., Dubovik O., Chaikovskiy A., et al. Enhancement of aerosol characterization using synergy of lidar and sun-photometer coincident observations: the GARRLiC algorithm // Atmos. Meas. Techn. — 2013. — 6, N 8. — P. 2065—2088.
 18. Milinevsky G., Danylevsky V., Bovchaliuk V., et al. Aerosol seasonal variations over urban sites in Ukraine and Belarus according to AERONET and POLDER measurements // Atmos. Meas. Techn. Discussions. — 2013. — 6, N 6. — P. 10731—10759.
 19. Milinevsky G., Danylevsky V., Bovchaliuk V., et al. Aerosol seasonal variations over urban-industrial regions in Ukraine according to AERONET and POLDER measurements // Atmos. Meas. Techn. — 2014. — 7. — P. 1459—1474. — <https://doi.org/10.5194/amt-7-1459-2014>
 20. Milinevsky G., Yatskiv Y., Degtyaryov O., et al. New satellite project Aerosol-UA: Remote sensing of aerosols in the terrestrial atmosphere // Acta Astronautica. — 2016. — 123. — P. 292—300.
 21. Mortier A., Goloub P., Podvin T., et al. Detection and characterization of volcanic ash plumes over lille during the Eyjafjallajökull eruption // Atmos. Chem. Phys. — 2013. — 13, N 7. — P. 3705—3720.
 22. Nicolae D., Nemuc A., Müller D., et al. Characterization of fresh and aged biomass burning events using multiwavelength Raman lidar and mass spectrometry // J. Geophys. Res: Atmospheres. — 2013. — 118, N 7. — P. 2956—2965.
 23. Stocker T. F. et al. (Ed.). IPCC, 2013: Climate change 2013: the physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2013.—1535 p.
 24. Weitkamp C. (Ed.). Lidar: range-resolved optical remote sensing of the atmosphere (Springer Series in Optical Sciences Vol. 102). 2005. — New York: Springer, 2006. — 456 p.
- Стаття надійшла до редакції 19.04.17*
- ## REFERENCES
1. Yatskiv Ya. S., Mishhenko M. I., Rozenbush V. K. Proekt «Aerosol-UA»: distancionnoe zondirovanie ajerozolej v zemnoj atmosfere so sputnika [Project “Aerosol-UA”: remote sensing of aerosols in the Earth’s atmosphere from a satellite]. *Kosm. nauka tehnol.*, **18** (N 4), 3—15 (2012) [in Russian].
 2. Yatskiv Ya. S., Milinevs'kyj H. P. Informatsiia pro zadymlenist' atmosfery v m. Kyievi [Information about smoky atmosphere in Kyiv city]. *Visnyk Nat. akad. nauk Ukrainy* [Visnyk of National Academy of Science of Ukraine], N 10, 25—30 (2015) [in Ukrainian].
 3. Bovchaliuk A., Milinevsky G., Danylevsky V., et al. Variability of aerosol properties over Eastern Europe observed from ground and satellites in the period from 2003 to 2011. *Atmos. Chem. Phys.*, **13** (N 13), 6587—6602 (2013) [in English].
 4. Bovchaliuk V., Bovchaliuk A., Milinevsky G., et al. Aerosol Microtops II sunphotometer observations over Ukraine. *Adv. Astron. and Space Phys.*, 3 (N 1), 46—52 (2013) [in English].
 5. Bovchaliuk V., Goloub P., Podvin T., et al. Comparison of aerosol properties retrieved using GARRLiC, LIRIC, and Raman algorithms applied to multi-wavelength lidar and sun/sky-photometer data. *Atmos. Meas. Techn.*, **9** (N 7), 3391—3405 (2016) [in English].
 6. Chin M., Diehl T., Tan Q., et al. Multi-decadal aerosol variations from 1980 to 2009: a perspective from observations and a global model. *Atmos. Chem. Phys.*, **14**, 3657—3690 (2014) [in English].
 7. Draxler R. R., Hess G. D. An overview of the HYSPLIT_4 modelling system for trajectories. *Austral. meteorological Mag.*, **47** (N 4), 295—308 (1998) [in English].
 8. Dubovik O., Herman M., Holdak A., et al. Statistically optimized inversion algorithm for enhanced retrieval of aerosol properties from spectral multi-angle polarimetric satellite observations. *Atmos. Meas. Techn.*, **4** (N 5), 975 (2011) [in English].
 9. Dubovik O., Holben B., Eck T. F., et al. Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations. *J. Atmos. Sci.*, **59** (N 3), 590—608 (2002) [in English].
 10. Dubovik O., King M. D. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements. *J. Geophys. Res.: Atmospheres*, **105D** (N 16), 20673—20696 (2000) [in English].
 11. Holben B. N., Eck T. F., Slutsker L., et al. AERONET—A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sens. Environ.*, **66** (N 1), 1—16 (1998) [in English].
 12. Klett J. D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns. *Appl. Opt.*, **20** (N 2), 211—220 (1981) [in English].
 13. Klett J. D. Lidar inversion with variable backscatter/extinction ratios. *Appl. Opt.*, **24** (N 11), 1638—1643 (1985) [in English].
 14. Krueger A. J., Minzner R. A. A mid-latitude ozone model for the 1976 US Standard Atmosphere. *J. Geophys. Res.*, **81** (N 24), 4477—4481 (1976) [in English].
 15. Lenoble J., Remer L., Tanré D. (Eds). (2013). Aerosol remote sensing. Springer Science & Business Media. [in English]
 16. Lopatin A. Enhanced remote sensing of atmospheric aerosol by joint inversion of active and passive remote sensing observations (Doctoral dissertation, Lille 1) (2013) [in English].

17. Lopatin A., Dubovik O., Chaikovsky A., et al. Enhancement of aerosol characterization using synergy of lidar and sun-photometer coincident observations: the GARRLiC algorithm. *Atmos. Meas. Techn.*, **6** (N 8), 2065–2088 (2013) [in English].
18. Milinevsky G., Danylevsky V., Bovchaliuk V., et al. Aerosol seasonal variations over urban sites in Ukraine and Belarus according to AERONET and POLDER measurements. *Atmos. Meas. Techn. Discussions*, **6**(6), 10731–10759 (2013) [in English].
19. Milinevsky G., Danylevsky V., Bovchaliuk V., et al. Aerosol seasonal variations over urban-industrial regions in Ukraine according to AERONET and POLDER measurements. *Atmos. Meas. Techn.*, **7**, 1459–1474 (2014) [in English].
20. Milinevsky G., Yatskiv Y., Degtyaryov O., et al. New satellite project Aerosol-UA: Remote sensing of aerosols in the terrestrial atmosphere. *Acta Astronautica*, **123**, 292–300 (2016) [in English].
21. Mortier A., Goloub P., Podvin T., et al. Detection and characterization of volcanic ash plumes over Lille during the Eyjafjallajökull eruption. *Atmos. Chem. Phys.*, **13** (N 7), 3705–3720 (2013) [in English].
22. Nicolae D., Nemuc A., Müller D., et al. Characterization of fresh and aged biomass burning events using multiwavelength Raman lidar and mass spectrometry. *J. Geophys. Res.: Atmospheres*, **118** (N 7), 2956–2965 (2013) [in English].
23. Stocker T. et al. (Ed.). IPCC, 2013: Climate change 2013: the physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 1535 p. (Cambridge University Press, Cambridge, 2014) [in English].
24. Weikamp C. (Ed.). Lidar: range-resolved optical remote sensing of the atmosphere (Vol. 102). Springer Science & Business. (2006). [in English].

Received 19.04.17

В. Бовчалоук¹, Г. Милиневский^{1,2}, В. Данилевський¹,
Ф. Голуб³, М. Сосонкин², Ю. Юхымчук¹, Т. Подвін³

¹ Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев, Украина

² Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины, Киев, Украина

³ Лаборатория оптики атмосферы Университета Лилль 1, Лилль, Франция

СВОЙСТВА АЭРОЗОЛЯ В АТМОСФЕРЕ НАД КИЕВОМ ПО ЛИДАРНЫМ И ФОТОМЕТРИЧЕСКИМ НАБЛЮДЕНИЯМ

В статье изложены результаты анализа оптических и микрофизических свойств аэрозольных частиц и их распределения в атмосфере над Киевом в начале сентября 2015 г. по данным лидарных и фотометрических наблюдений до и во время загрязнения атмосферы вследствие лесных и торфяных пожаров. Наблюдения были выполнены с по-

мощью лидара CIMEL370 и солнечного фотометра станции Киев сети AERONET расположенных на крыше корпуса Главной астрономической обсерватории НАН Украины в Киеве. Для анализа данных использовался недавно разработанный алгоритм GARRLiC: Generalized Aerosol Retrieval from Radiometer and LIDAR Combined Data. Установлено что в начале события, 1 и 2 сентября в атмосфере над Киевом наблюдался типичное состояние атмосферы с незначительным содержанием аэрозоля, а с вечера 2 сентября в Киев с северо-северо-западного направления поступило большое количество продуктов горения, повлекшее повышение содержания аэрозоля в несколько раз. При этом впервые в Украине по данным лидарных наблюдений воссозданы характеристики аэрозоля в зависимости от высоты над поверхностью. Проведено сравнение характеристик аэрозоля с соответствующими значениями полученными по алгоритму AERONET.

Ключевые слова: аэрозоль, свойства аэрозоля, высотное распределение аэрозоля, лидарные наблюдения, фотометрические наблюдения, лесные и торфяные пожары.

V. Bovchaliuk¹, G. Milinevsky^{1,2}, V. Danylevsky¹,
Ph. Goloub³, M. Sosonkin², Yu. Yukhimchuk¹, T. Podvin³

¹ Kyiv National Taras Shevchenko University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

² Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

³ Laboratoire d'Optique Atmosphérique, Lille1 University, Villeneuve d'Ascq, France

AEROSOL PROPERTIES IN ATMOSPHERE OVER KYIV USING LIDAR AND SUN-PHOTOMETER OBSERVATIONS

The article presents analysis of optical and microphysical aerosol properties, and their distribution in atmosphere over Kyiv city using lidar and sun-photometer observation at the beginning of September 2015. This period of time characterized with forest and peat fires nearby and at suburb of Kyiv. Observations were carried out with the CIMEL370 lidar and the sun-photometer of the AERONET Kyiv station located on the roof of the Main astronomical observatory of the NAS of Ukraine. The recently developed GARRLiC (Generalized Aerosol Retrieval from Radiometer and LIDAR Combined Data) algorithm was used for data analysis. It was established that at the beginning of the event (1-2 September) typical atmosphere with insignificant aerosol content was observed. A large amount of combustion products which increase aerosol content in several times has arrived into Kyiv from north-north-west direction starting from evening of 2 September. Range resolved aerosol properties were obtained in the first time for Ukraine region. Comparison with the corresponding values of aerosol properties obtained by the AERONET algorithm is made.

Keywords: aerosol, aerosol properties, height resolved aerosol distribution, lidar observations, photometric observations, forest and peat fires.