

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ГОЛОВНА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ

**БОВЧАЛЮК Валентин Павлович**

УДК 551.510.42; 681.785.5:504.3

**Фотометричні та лідарні дослідження аерозолів в атмосфері над Україною**

05.07.12 – дистанційні аерокосмічні дослідження

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі астрономії та фізики космосу фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник  
**Міліневський Геннадій Петрович,**  
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,  
головний науковий співробітник.

**Офіційні опоненти:** доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник  
**Залізовський Андрій Владиславович,**  
Радіоастрономічний інститут НАН України,  
завідувач відділу радіофізики геокосмосу;

кандидат фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник  
**Краковська Світлана Володимирівна,**  
Український гідрометеорологічний інститут  
ДСНС України та НАН України,  
в.о. зав. лабораторії прикладної кліматології відділу  
прикладної метеорології й кліматології.

Захист відбудеться «15» листопада 2019 р. на засіданні Спеціалізованої вченої ради Д 26.208.01 при Головній астрономічній обсерваторії НАН України за адресою: Головна астрономічна обсерваторія НАН України, вул. Академіка Заболотного, 27, м. Київ, 03143.

Початок засідань о 10 годині.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці ГАО НАН України за адресою: Головна астрономічна обсерваторія НАН України, вул. Академіка Заболотного, 27, м. Київ, 03143.

Автореферат розіслано « 10 » жовтня 2019 р.

Вчений секретар  
Спеціалізованої вченої ради  
кандидат фізико-математичних наук

І.Е. Васильєва

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Аерозолі у земній атмосфері досліджуються з двох головних позицій: як важливий кліматологічний чинник, що впливає на процеси переносу випромінювання і перерозподілу його енергії у кліматичній системі Землі, і як забруднювач, що впливає на якість атмосферного повітря. Коректне врахування внеску аерозолів в енергетичний баланс земної атмосфери вважається однією з основних сучасних проблем при моделюванні та прогнозуванні змін клімату. Аерозолі – одна з найбільш змінних за вмістом і оптичними характеристиками домішок у атмосфері, яка впливає на клімат нашої планети, а їхні варіації та довготривалі тренди є найменш кількісно вивченими факторами. Це зумовлює значну невизначеність при прогнозуванні змін навколишнього середовища та глобального і регіонального клімату, зокрема і у зв'язку з антропогенним навантаженням. Для адекватного модельного оцінювання розподілу аерозолів та їхнього кліматичного ефекту, які можуть істотно змінюватись з часом у регіональних масштабах, необхідна достатня кількість спостережних даних якомога вищої точності. На території України спостережних даних сучасного рівня точності одержується дуже мало. Це дані дистанційних наземних вимірювань аерозольної спектральної оптичної товщини, що неперервно протягом декількох років виконуються в Києві та у Харківській області за допомогою сонячних фотометрів AERONET (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov>), та лідарні спостереження в Києві, що проводилися в період липня–вересня 2015 року. Додатково можна використовувати дані супутникових вимірювань та дані вимірювань портативним сонячним фотометром Microtops II. Також для аналізу даних використовують моделювання зворотних траєкторій руху повітряних мас. Об'єднання всіх типів даних збільшує спостережну базу і точність модельного оцінювання розподілу аерозолів.

Численні дослідження показують, що аерозолі негативно впливають на стан здоров'я населення та є забруднювачами повітря. Наприклад, з аерозолями, зокрема тими, що містять  $\text{SO}_2$ , сульфати й кислоти, пов'язують загострення астми та інших респіраторних захворювань і алергічних реакцій. Аерозолі, або ж матеріальні частинки (Particulate matter – PM в англійській літературі або ж завислі речовини – в термінології Центральної геофізичної обсерваторії, <http://www.cgo.kiev.ua/index.php>), за їхнім впливом на здоров'я розподіляють на три категорії: крупнодисперсні, з аеродинамічним діаметром 2.5 – 10 мкм (як правило, це пил), дрібнодисперсні з розмірами <2.5 мкм і ультрадрібні з розмірами <0.1 мкм. Як стандарт для оцінки якості повітря використовується запропонована Агентством захисту довкілля США (United States Environmental Protection Agency, EPA, <http://www.epa.gov>) концентрація аерозольних частинок з аеродинамічним діаметром <2.5 мкм ( $\text{PM}_{2.5}$ ) та <10 мкм ( $\text{PM}_{10}$ ), яка вимірюється у  $\text{мкг}/\text{м}^3$ . Епідеміологічні дослідження вказують на зростання кардіореспіраторних захворювань і смертності зі збільшенням рівнів  $\text{PM}_{2.5}$

і  $PM_{10}$ . Хоча  $PM_{2.5}$  становить лише частину  $PM_{10}$ , вона відстежується й стандартизується окремо, оскільки ці частинки хоча й мають меншу масу, але вони більш токсичні, а ультрадрібні частинки є потенційно ще токсичнішими, оскільки, як показують останні дослідження, вони здатні проникати у системи кровообігу. За оцінками Всесвітньої організації охорони здоров'я (The World Health Organization – WHO) забруднення повітря частинками  $PM$  призводить до приблизно 800 тис. випадків передчасної смерті у світі щороку.

Отже, з аерозольним забрудненням атмосфери пов'язано багато практичних проблем в галузі кліматології, охорони довкілля та здоров'я населення. Зокрема, це – проблеми, важливою інформацією для яких є рівень забруднення та фізико-хімічні властивості атмосферних аерозолів. При цьому надзвичайно важливим є виявлення джерел надходження аерозольних частинок у атмосферу, їх вертикального розподілу, дослідження фізико-хімічних механізмів їхнього утворення з газів-прекурсорів та перетворень у атмосфері, часу перебування у ній і шляхів та швидкості розповсюдження, зокрема й перенесення повітряними потоками. Для оцінювання кліматологічних ефектів необхідно вимірювати вміст і оптичні характеристики аерозолів у всьому стовпі атмосфери над місцем спостережень, тоді як для оцінювання впливу аерозольних частинок на якість повітря і здоров'я населення важливо знати концентрацію частинок у приземному шарі атмосфери. При цьому потрібно враховувати й вплив переміщень повітряних мас та дифузію частинок. Отже, необхідними є комплексні дослідження аерозолів різними методами: дистанційними, такими як наземні вимірювання їхніх оптичних характеристик у окремих місцевостях за допомогою сонячних фотометрів, супутникові вимірювання над великими регіонами, вимірювання вертикального розподілу частинок, а також вимірювання концентрацій частинок  $PM_{2.5}$  і  $PM_{10}$  у приземному шарі повітря та моделювання фізичних і хімічних процесів у атмосфері.

Як зазначалося раніше, найбільш важливим джерелом невизначеності є велика мінливість аерозолів у просторі та часі. Через їх короткий час життя та взаємодії з іншими частинками атмосфери їх глобальні концентрації та властивості маловідомі. Через це моніторинг тривимірного розподілу аерозолів на великих масштабах є надзвичайно актуальним. Лідарні спостереження в цьому випадку є найбільш відповідним інструментом.

Після знаходження оптичних та мікрофізичних параметрів аерозолів, а також їх сезонних варіацій та вертикального розподілу можна знайти коректне значення їх внеску в енергетичний баланс земної атмосфери.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Основні результати, викладені в дисертації, отримані автором під час навчання в аспірантурі на кафедрі астрономії та фізики космосу фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка та при виконанні міжнародних дослідницьких

проектів, у яких автор брав участь як виконавець, а саме: за договорами №10ДП051-05 (CRDF №UKG2-2969-KV-09) “Дослідження атмосферного аерозолу над Україною методами наземних вимірювань у поєднанні з супутниковими даними” (№ держреєстрації 0110U006892), №12ДФ051-12 “Динаміка, великомасштабний перенос і кліматичні характеристики атмосферних аерозолів у Білорусько-Українському регіоні за даними дистанційних наземних та супутникових вимірювань” (№ держреєстрації 0112U005156), №12ДП051-14 “Дослідження атмосферного аерозолу над Україною методами наземних вимірювань у поєднанні із супутниковими даними” (№ держреєстрації 0112U005282), PICS2013-15 “Вплив аерозолу, водяної пари та озону на регіональний клімат України” (№ держреєстрації 0113U005430) та №17ДФ051-01 “Накопичення, опрацювання й аналіз спостережних даних про вміст і характеристики дрібнодисперсного аерозолу у атмосфері над територією України та прилеглими регіонами східної Європи” (№ держреєстрації 0117U001573), SHADOW-2 Лабораторії оптики атмосфери Університету Лілль-1 з досліджень аерозолу лідарними методами у Дакарі (Сенегал) та Ліллі (Франція).

**Мета і завдання дослідження.**

*Об’єкт дослідження* — аерозольний шар в атмосфері над Україною та прилеглими територіями.

*Предмет дослідження* — закономірності просторово-часового розподілу та характеристики аерозолів над Україною.

*Мета роботи:* визначення основних закономірностей просторово-часового розподілу та впливу на радіаційний баланс атмосферних аерозолів над Україною, зокрема над Києвом, за даними наземних (сонячного фотометра та лідара) та супутникових спостережень.

**Завдання дослідження:**

1. Визначити характеристики аерозолів над Україною, зокрема над Києвом, за вимірюваннями сонячних фотометрів та лідара.
2. Дослідити закономірності сезонних варіацій властивостей аерозолу над Україною.
3. Визначити вертикальний розподіл екстинкції аерозолів та з’ясувати джерела забруднення в атмосфері над станцією AERONET Київ.
4. Визначити значення прямого аерозольного радіаційного форсингу на різних висотах над станцією AERONET Київ за різним вмістом аерозолу.

**Методи дослідження.** Методами дослідження є кореляційний аналіз, аналіз рядів даних параметрів аерозолів для визначення сезонних варіацій аерозолів, точкові діаграми для класифікації типів аерозолів, метод GARRLiC для визначення фізичних та мікрофізичних параметрів аерозолів та вертикального розподілу екстинкції аерозолів, метод зворотних траєкторій руху повітряних мас для визначення джерел аерозолів, порівняння результатів наземних та супутникових

спостережень, алгоритм GAME для визначення радіаційного форсингу, спричиненого різним вмістом аерозолів.

**Наукова новизна одержаних результатів.** При проведенні дослідження отримано такі результати:

- вперше визначено сезонні варіації мікрофізичних параметрів аерозолів над Україною;
- вперше проведена сезонна класифікація аерозолів за їх типом над Україною;
- вперше визначено вертикальний розподіл аерозолів в атмосфері над Україною, зокрема над Києвом, за лідарними спостереженнями;
- вперше визначено залежність радіаційного форсингу від вертикального розподілу та різного вмісту аерозолів над Україною.

**Практичне значення одержаних результатів.**

1. Отримані в роботі результати просторово-часової динаміки атмосферних аерозолів становлять інтерес для розрахунку екологічних ризиків, моніторингу та прогнозування метеорологічних умов забруднення атмосфери над Україною. Так, наприклад, дані можуть використовуватися в авіаційній безпеці — частинки можуть створювати масштабні перешкоди на трасах повітряного руху, тому що потрапляння аерозолів у турбіни реактивних двигунів може вивести їх з ладу (прикладом може слугувати виверження вулкана Ейяф'ятлайокютль, що призвів до зупинки авіаруху у всій Європі у 2010 році).

2. Знайдені мікрофізичні властивості та основні типи аерозолів над м. Києвом. Ці дані можуть використовуватися як в медичній сфері, так і для точнішого моделювання фізико-хімічних процесів в атмосфері.

3. Вперше були проведені лідарні спостереження, що дають змогу зрозуміти висотний розподіл аерозолів над м. Києвом. Отримані дані можуть використовуватися для уточнення моделювання фізико-хімічних процесів в атмосфері.

4. Визначений радіаційний форсинг у залежності від різного вмісту аерозолів може бути використаний для уточнення значення радіаційного форсингу земної атмосфери.

5. Методика та результати лідарних вимірювань аерозолію будуть використовуватись під час експериментів з калібрування та валідації спостережень у космічному проекті Аерозоль-UA.

**Достовірність і обґрунтованість результатів досліджень** підтверджена оцінкою похибок величин АОТ, показника Ангстрема, альbedo одноразового розсіяння, комплексного показника заломлення, вертикального розподілу коефіцієнта екстинкції; застосуванням жорстких критеріїв відбору при формуванні вибірок даних для аналізу; апробацією результатів досліджень у фахових журналах, а також на міжнародних наукових конференціях.

**Особистий внесок здобувача.** Викладені в дисертації результати отримані особисто автором.

У роботі [1] здобувач приймав участь у постановці задачі, обговоренні результатів та формулюванні висновків. У роботі [2] здобувач брав участь у постановці задачі, була проведена обробка та аналіз спостережних даних, сформульовані висновки. У роботі [3] здобувачем була поставлена задача з перехресного калібрування, здобувач проводив спостереження, розробив методіку калібрування, програмне забезпечення, провів обробку та аналіз спостережних даних. У роботі [4] автором були проведені спостереження, поставлено наукову задачу, проведено обробку та аналіз даних та сформульовано висновки. У роботах [5, 6] здобувач брав участь у постановці наукових задач та обговоренні результатів. У роботах [7, 8] здобувач брав участь у постановці наукових задач, частково обробці наземних даних, обговоренні отриманих результатів та висновків.

**Апробація результатів дисертації.** Результати досліджень, представлені в роботі, доповідалися на наукових конференціях:

International Conference dedicated to 90-th Anniversary of P.R. Romanchuk, Kyiv, 2011;

19th Open Young Scientist's Conference on Astronomy and Space Physics, Kyiv, 2012;

International Conference "Astronomy and Space Physics" dedicated to the memory of A.V. Mandzhos, Kyiv, 2012;

12th Ukrainian conference on space research, Yevpatoria, 2012;

14th Ukrainian conference on space research, Uzhgorod, 2014;

20th Young Sci2entists' Conference on Astronomy and Space Physics, Kyiv, 2013;

Міжнародна наукова конференція "Астрономія та фізика космосу в Київському університеті", Київ, 2015.

**Публікації.** Викладені в дисертації наукові результати опубліковано протягом 2011 – 2017 років: всього – 17 публікацій, серед них – 7 статей (у тому числі 3 першого авторства) у фахових вітчизняних і зарубіжних наукових журналах [1–7], 10 – у тезах конференцій [8–17].

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, додатку, списку використаних джерел (213 найменувань). Рисуноків – 30, таблиць – 8. Загальний обсяг дисертації складає 145 сторінок.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** визначено мету та задачі дисертації, описано засоби їх вирішення. Показано зв'язок роботи із науковими програмами та темами, наведено інформацію про апробацію результатів, наявність публікацій за темою дисертації. Обґрунтовано наукову новизну роботи та практичне значення отриманих результатів.

**Перший розділ** “Загальна характеристика аерозолів, методів досліджень, обґрунтування задач дослідження” містить огляд літератури з описом типів аерозолів, їх впливу на клімат, подано фізичні і мікрофізичні властивості аерозолів. Розглянуто наземні пасивні та активні дистанційні методи спостереження аерозолів. Виокремлено головні переваги використання лідарних спостережень та наземної мережі сонячних фотометрів AERONET. Розглянуто принцип роботи лідарів, їх типи та методи обробки лідарних даних. Розглянуто визначення радіаційного форсингу. Представлено характеристики аерозолів над Україною у 1950–2000-х роках.

Огляд літератури дозволяє зробити висновок про недостатню вивченість детальних характеристик сезонних варіацій аерозолів, особливо мікрофізичних властивостей аерозолів у Східноєвропейському регіоні.

Загалом, динаміка та просторовий (вертикальний в тому числі) розподіл атмосферних аерозолів над Україною недостатньо досліджені для оцінки їх впливу на зміну клімату в регіональному і глобальному масштабі та якість повітря, тому на вирішення цих завдань і спрямована наша робота.

**У другому розділі** “Сезонні варіації аерозолів над Україною” представлено сезонні варіації аерозолів над Україною з акцентом на аналіз властивостей та динаміки аерозолів над міськими промисловими районами України, які визначалися за спостереженнями сонячних фотометрів міжнародної мережі AERONET та орбітального спектро радіометра POLDER. Для аналізу було вибрано 8 промислових міст України: Київ, Луганськ, Донецьк, Харків, Дніпро, Рівне, Львів, Севастополь та, для порівняння, Білорусі: Мінськ. Були знайдені усереднені за місяць значення аерозольної оптичної товщі (aerosol optical thickness) AOT (440 та 870 нм) та показника Ангстрема (Angstrom exponent) AE (440–675 нм, 440–870 нм) за даними AERONET для Києва, Мінська та Луганська. Також були знайдені усереднені значення AOT (865 нм) та показника Ангстрема (670–865 нм) за місяць за даними супутникового спектро радіометра POLDER для всіх промислових міст зі списку вище. Порівняння значень AOT між даними AERONET та POLDER показало, що значення AOT (865 нм) POLDER нижчі за відповідні значення AOT (870 нм) AERONET. Це пов’язано з тим, що спостереження POLDER чутливіші до дрібнодисперсної фракції аерозолів, тоді як дані AERONET містять обидві фракції, дрібно- та крупнодисперсну.

Усереднені значення параметрів аерозолів за даними AERONET та POLDER подібні за динамікою у східних та центральних областях України: значення оптичної товщі мають максимуми навесні (квітень – травень) та пізнього літа (серпень), а мінімум спостерігається пізньої осені. Поведінка аерозольних параметрів над західними регіонами України трохи відрізняється більш ранньою появою максимумів AOT восени і влітку. Такий сезонний хід у параметрах аерозолів загалом відповідає дослідженням по іншим районам Європи. Їх результати також вказують



на те, що аерозолі від спаленої біомаси та, можливо, пилу Сахари, відповідають за великі значення АОТ у весняний період.

Об'ємна концентрація аерозольних частинок над Києвом та Мінськом має два максимуми в теплу частину року (рис. 1). Значення АОТ, загальне значення об'ємної концентрації так само, як об'ємні концентрації дрібно- та крупнодисперсної фракції аерозолів над Мінськом, мають однаковий тренд, окрім липня та грудня, та два максимуми в квітні–травні та серпні. Такі варіації характерні і для Києва, проте загальна об'ємна концентрація аерозолів досягає максимуму в червні разом з максимумом об'ємної концентрації крупнодисперсних аерозолів, тоді як максимум значення АОТ досягається в квітні одночасно з максимумом об'ємної концентрації дрібнодисперсних аерозолів. Загальне значення об'ємної концентрації досягає свого мінімуму в зимовий період, коли в атмосфері переважають частинки дрібнодисперсної фракції.

Аналіз даних показує, що значення АОТ та об'ємної концентрації над Києвом вищі, ніж над Мінськом, проте сезонні варіації схожі. Це може говорити про наявність більшої кількості джерел та/або більш інтенсивний викид аерозолів в атмосферу над Києвом. І в той самий час схожість сезонних варіацій АОТ, АЕ та об'ємної концентрації вказує на схожість основних джерел викиду аерозолів (транспорт, індустрія, ерозія ґрунтів).

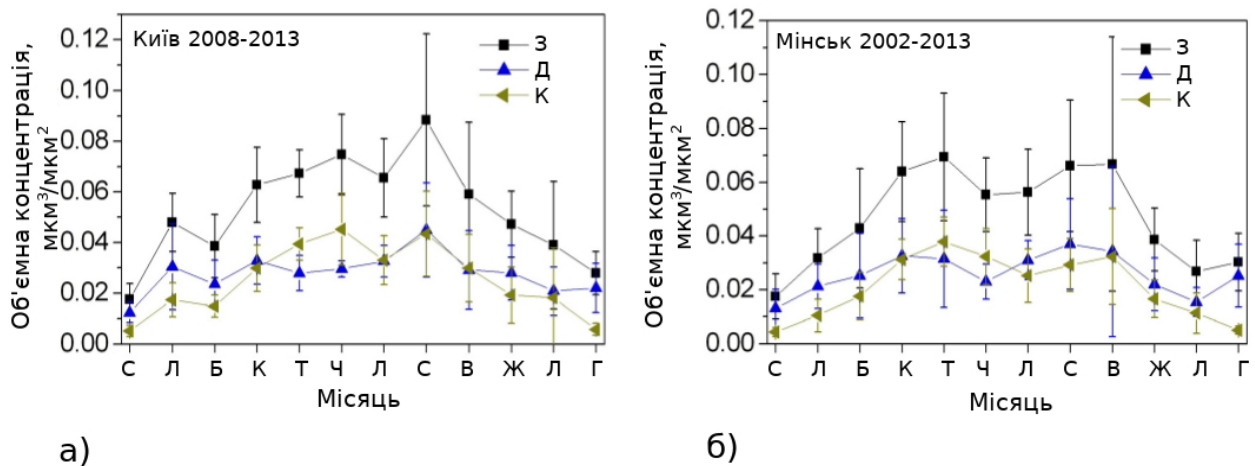


Рис. 1. Сезонні варіації об'ємної концентрації частинок (З – загальної, Д – дрібно- та К – крупнодисперсної фракції) над Києвом (а) та Мінськом (б).

Кількість крупнодисперсних аерозолів протягом теплого періоду в середньому вдвічі більша у порівнянні з відповідним значенням протягом холодного періоду. Припускаємо, що це спричинено великою площею відкритих земельних ділянок на півдні України та південно-східній європейській частині Росії, де в теплий період року спостерігаються пилові бурі, тоді як у холодний період ці ділянки в основному вкриті снігом, що запобігає підняттю пилу.

Для виявлення сезонної поведінки мікрофізичних параметрів аерозолів, що було зроблено вперше для спостережень над територією України, і для оцінки типів аерозолів були проаналізовані такі параметри, як альbedo одноразового розсіювання SSA (single scattering albedo) та комплексний показник заломлення CRI (complex refractive index). Усереднені значення SSA за місяць були розділені на дві групи: протягом теплого періоду (квітень–жовтень) SSA мають вищі значення та відносно гладкий та одноманітний спектральний хід; протягом холодного періоду (листопад–березень) значення SSA менші, а саме: спектральний хід зменшується швидше зі збільшенням довжини хвилі. Усереднені спектральні значення CRI також відрізняються для теплого та холодного періоду. Усереднені величини дійсної частини комплексного показника заломлення протягом грудня–березня мають найменші значення. Отримані значення та спектральні зміни SSA та показника заломлення відповідають суміші індустриальних аерозолів, спаленої біомаси та пилу.

Порівняння значень SSA та CRI по пункту спостереження AERONET Київ з іншими спостережними пунктами Європи показує, що аерозольні частинки над Києвом відносяться до аерозолів індустриального походження. Сезонні варіації SSA та CRI відображають зміну складу частинок, зокрема, збільшення AOT навесні, завдяки зростанню концентрації крупнодисперсних аерозолів, пов'язано з підняттям пилу, що відповідає підвищеним показникам RRI в квітні.

Для застосування методу кластерного аналізу були побудовані точкові діаграми різних параметрів аерозолів для виділення їх типів над Києвом. Так взаємозв'язок між SSA та EAE (параметр Ангстрема, отриманий з коефіцієнтів екстинції) показує (рис. 2а та 2б), що аерозолі, виміряні над Києвом, відносяться в основному до індустриального типу аерозолів та частково аерозолів від спалювання біомаси. Інший аналіз базується на зв'язку між AE та різницею AE (рис. 2в), даний метод був розроблений через обмеження алгоритмом AERONET до відтворення SSA та об'ємного розподілу за розміром з хорошою точністю. Відповідно до аналізу в зимові місяці спостерігаються індустриальні аерозолі з малою присутністю пилу. Протягом весняних місяців спостерігаються індустриальні аерозолі з пилом та малою часткою частинок спаленої біомаси. Протягом літніх місяців переважають індустриальні аерозолі, а також спостерігаються частинки спаленої біомаси. Восени переважають індустриальні аерозолі та змішаний тип аерозолів, проте також спостерігається не класифікований тип аерозолів у сегменті значень, близьких до 1.5 (AE(440–675 нм) – AE(675–870 нм)) та 1.5 AE (440–870 нм) (див. рис. 2в). Точкові діаграми відповідають сезонним варіаціям AOT з малими значеннями взимку та восени і великими значеннями навесні та влітку. Сезонна поведінка пояснюється впливом місцевих джерел, а також за рахунок транспорту аерозолів. Згідно з аналізом зворотних траєкторій повітряних мас, аерозольні частинки індустриального типу транспортуються переважно з регіонів Західної Європи навесні та влітку.

Зворотні траєкторії були досліджені за допомогою кластерного аналізу для визначення 5 траєкторій з переважними напрямками руху повітряних мас за певний період часу. Аналізувалися траєкторії, усереднені за сезонами у період 2008 – 2013 років. Суть методу кластеризації полягає у мінімізації відмінності між траєкторіями всередині кластера, в той час як відмінності між кластерами є максимальними (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>). Розрахована траєкторія представляє рух повітряних мас протягом 48 годин перед спостереженнями на висоті  $\sim 1.5$  км (850 гПа) над рівнем моря.

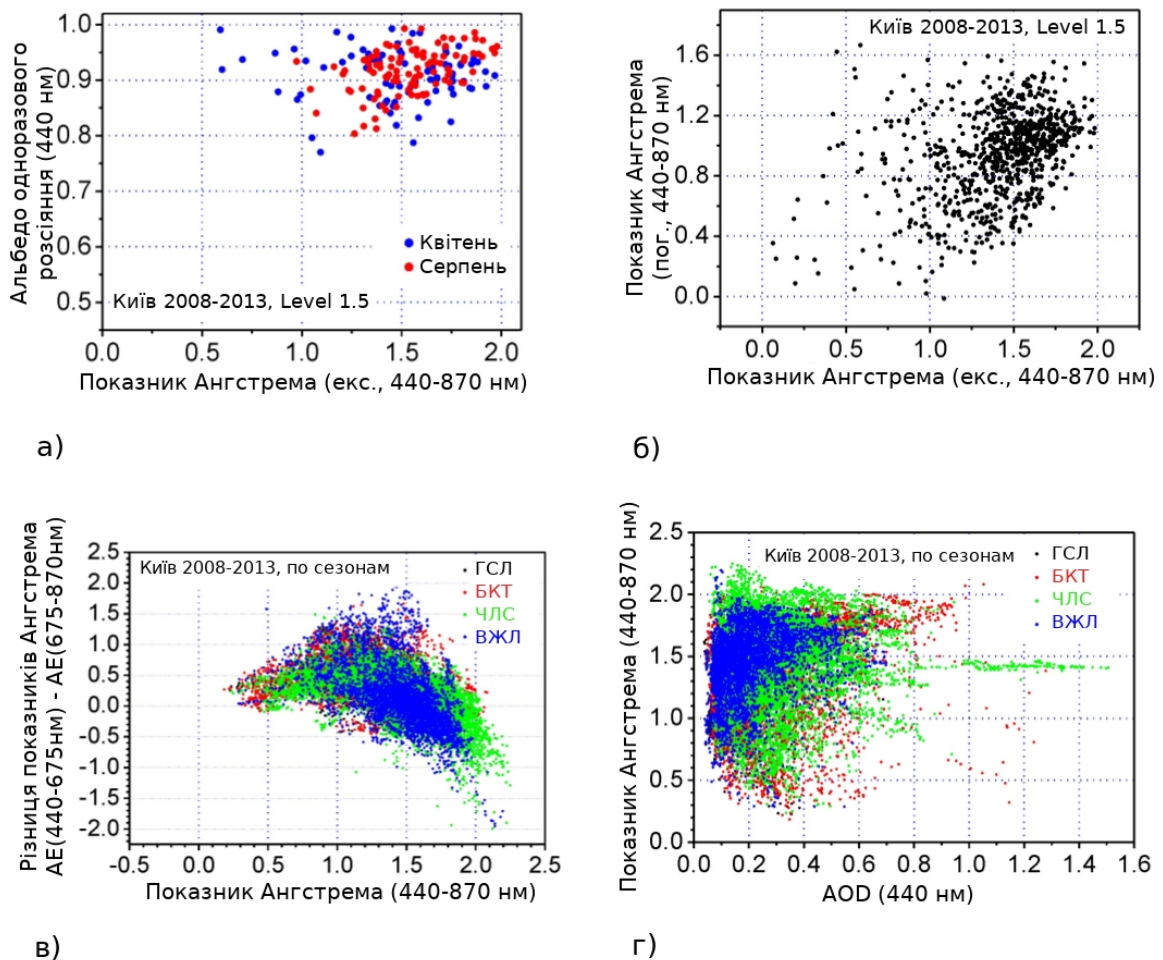


Рис. 2. Точкові діаграми для визначення типів аерозолів над Києвом: а) – альbedo одноразового розсіяння на довжині хвилі 440 нм у залежності від показника Ангстрема, визначеного з коефіцієнтів екстинкції на 440 та 870 нм для квітня та серпня відповідно; б) – показники Ангстрема, визначені з коефіцієнтів поглинання та екстинкції (440 – 870 нм); в) – різниця показників Ангстрема (AE(440 – 675 нм) — AE(675 – 870 нм)) відносно AE (440 – 870 нм); г) – AE (440 – 870 нм) відносно AOD (440 нм).

Також за даними зі спостережного пункту AERONET Київ досліджувалася присутність пилу з Сахари. Відповідно до аналізу зворотних траєкторій повітряних

мас найбільш сприятливими сезонами для транспортування зі східних регіонів Середземномор'я, де часто спостерігається пил Сахари, є весна та осінь. Аерозольні параметри (SSA, CRI), відтворені з даних над Києвом навесні та в літні місяці, відповідають частинкам пилу Сахари. Отже, можна припустити, що пил Сахари, який транспортується через Середземне море в Європу, можливо, транспортується і до українських районів переважно наприкінці літа та восени (серпень–вересень) і рідше навесні.

**У третьому розділі** “Лідарні дослідження вертикального розподілу аерозолів” досліджено вертикальний розподіл аерозолів над м. Києвом під час події задимленості 1–6 вересня 2015 року. Спостереження здійснювалися за допомогою монохвильового (лідар з однією довжиною хвилі) лідара CIMEL370, що був наданий Лабораторією оптики атмосфери Університету Лілль-1. Лідар можна легко транспортувати, оскільки його загальна вага складає близько 40–45 кг. Він є стійким до атмосферних впливів (дощ, великий вітер) та безпечним для очей. Більше деталей наведено у таблиці 1. Подібні спостереження вертикального розподілу аерозолів проводилися в Україні вперше. Аналіз лідарних даних з використанням алгоритму GARRLiC проводився вперше.

Принцип роботи лідара базується на випромінюванні світлового пучка з певною довжиною хвилі в атмосферу Землі та вимірюванні інтенсивності розсіяного назад світла. Аерозольні частинки виступають у ролі мішеней, що розсіюють падаюче світло, а інтенсивність розсіяного назад світла залежить від концентрації та типу аерозольних частинок.

У найпростішій формі, рівняння, що описує лідарні спостереження, можна записати у такому вигляді:

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

де  $R$  – відстань від лідара,  $P(R)$  – інтенсивність випромінювання, виміряна детектором модуля реєстрації,  $K$  – коефіцієнт, що описує інструментальну продуктивність,  $G(R)$  – коефіцієнт, що описує геометрію спостережень,  $\beta(R)$  – коефіцієнт зворотного розсіяння,  $T(R)$  – коефіцієнт прозорості атмосфери,  $P_{bg}$  – інтенсивність фонового випромінювання, що була виміряна детектором модуля реєстрації лідара. Коефіцієнти  $K$  та  $G(R)$  залежать від лідарної системи, а  $\beta(R)$  та  $T(R)$  – невідомі і повинні бути визначеними зі спостережень.

Дане рівняння містить два невідомих, тому аналітичний розв’язок не може бути знайдений, або, як це вперше було запропоновано Клеттом (Klett), розв’язок може бути знайдений за умови взаємозалежності між цими невідомими. Цей розв’язок отримав назву метод Клетта, а параметр взаємозалежності отримав назву лідарного відношення:

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

Відповідно для порівняння та/або уточнення коефіцієнта екстинкції, що визначається з лідарних спостережень, може використовуватися коефіцієнт екстинкції, визначений з окремих радіометричних спостережень. Алгоритм, що використовує дані одночасних спостережень з сонячним фотометром та лідаром був розроблений у Лабораторії оптики атмосфери (Лілль, Франція) і має назву BASIC. Він базується на методі Клетта: профіль екстинкції визначається за ітераційною процедурою, в якій лідарне відношення дихотомічно змінюється до моменту рівності між коефіцієнтами екстинкції, визначеними з лідарних спостережень та спостережень з сонячним фотометром. Перевагою цього методу є уточнення лідарного відношення, яке вважається наперед відомим у методі Клетта.

Більш точний, але і більш складний метод, що використовувався для аналізу результатів спостережень у роботі, має назву GARRLiC (Generalized Aerosol Retrieval from Radiometer and LIDAR Combined data), що є частиною більш загального алгоритму GRASP (Generalized Retrieval of Atmosphere and Surface Properties, <http://www.grasp-sas.com/>) для аналізу одночасних наземних та супутникових вимірювань. GARRLiC містить одночасне моделювання даних сонячних фотометрів та лідарів. Автор дисертації брав участь у розробці цього алгоритму.

Таблиця 1

## Характеристики монохвильового лідара CIMEL370

Лазер	Твердотільний Nd:YAG з подвоєною частотою
Довжина хвилі	532 нм
Потужність лазера	50 – 100 мВт
Випромінювана енергія	8 – 20 мкДж
Частота випромінення	4.7 кГц
Довжина імпульсу	< 15 нс
Розходження лазерного пучка	55 мкрад
Поле зору телескопа	55 мкрад
Вертикальна роздільна здатність	15 м
Максимальна висота	30 км
Детектор	Лавинний фотодіод
Час збору даних	1 сек
Вага (модуль приймальної системи + телескоп)	25 кг + 15 кг
Розміри телескопа (діаметр × висота)	0.22 м × 1 м
Діапазон температур для телескопа	від –10°C до +50°C

Алгоритм GARRLiC працює з монохвильовими та багатохвильовими лідарними даними (у припущенні про пружне розсіювання). Алгоритм використовує вимірювання у декількох спектральних каналах для розділення внеску дрібнодисперсної та крупнодисперсної фракцій аерозолів. Отже, при однохвильових вимірюваннях (лідар, що використовувався для спостережень в Україні) можна відтворити лише вертикальний розподіл усіх аерозолів. При багатохвильових лідарних вимірюваннях можливо відтворити вертикальний розподіл як усіх частинок, так і кожної фракції окремо.

Протягом 1–6 вересня 2015 року у м. Києві спостерігалася задимленість атмосфери, що була спричинена стихійними пожежами лісу поблизу м. Києва, а також завдяки переносу повітряних мас з північно-західних областей України, де також відбувалася значна кількість лісових та торф'яних пожеж. Визначені фізичні та мікрофізичні властивості аерозолів (рис. 3) вказують на присутність у атмосфері над Києвом протягом 1–3 вересня 2015 р. суміші індустриальних аерозолів та частинок – продуктів горіння біомаси. Протягом 1–2 вересня спостерігався типовий стан атмосфери над Києвом (значення альbedo одноразового розсіювання та комплексного показника заломлення відповідають результатам, отриманим у розділі 2). А пік задимленості спостерігався 3 вересня (значення альbedo одноразового розсіювання та комплексного показника заломлення відповідають частинкам – продуктам горіння біомаси).

Загалом, відтворені такі параметри аерозолів, як оптична товща та комплексний показник Ангстрема за алгоритмом GARRLiC, добре узгоджуються з відповідними параметрами, визначеними за алгоритмом AERONET. Також був знайдений вертикальний розподіл коефіцієнта екстинкції до та під час інтенсивної події задимленості (рис. 4). Протягом 1-го та 2-го вересня на висотах від 0.5 до 1 км над земною поверхнею спостерігалось зростання коефіцієнта екстинкції від  $0.05$  до  $0.10 \text{ км}^{-1}$ , а на висотах від 1 до 4 км його середнє значення становило  $0.10 \text{ км}^{-1}$  і було однорідно розподілено. Під час задимленості атмосфери в Києві висотний розподіл аерозолів змінювався. Як і до події, спостерігалось зростання коефіцієнта екстинкції від  $0.15$  до  $0.20 \text{ км}^{-1}$  у висотних межах від 0.5 до 1.5 км, а вище даного рівня, в межах від 2 до 5 км, спостерігалась хмара аерозольних частинок з високою варіацією значення коефіцієнта екстинкції від  $0.05 \text{ км}^{-1}$  (14:35) до  $0.30 \text{ км}^{-1}$  (15:07). Як видно з рис. 4, частинки горіння переміщувалися на малих висотах і не підіймалися вище 5 км.

Під час події коефіцієнт екстинкції зростає, також зростає висота розповсюдження аерозолів. Відзначимо, що висотний розподіл екстинкції аерозолів отриманий в Україні вперше.

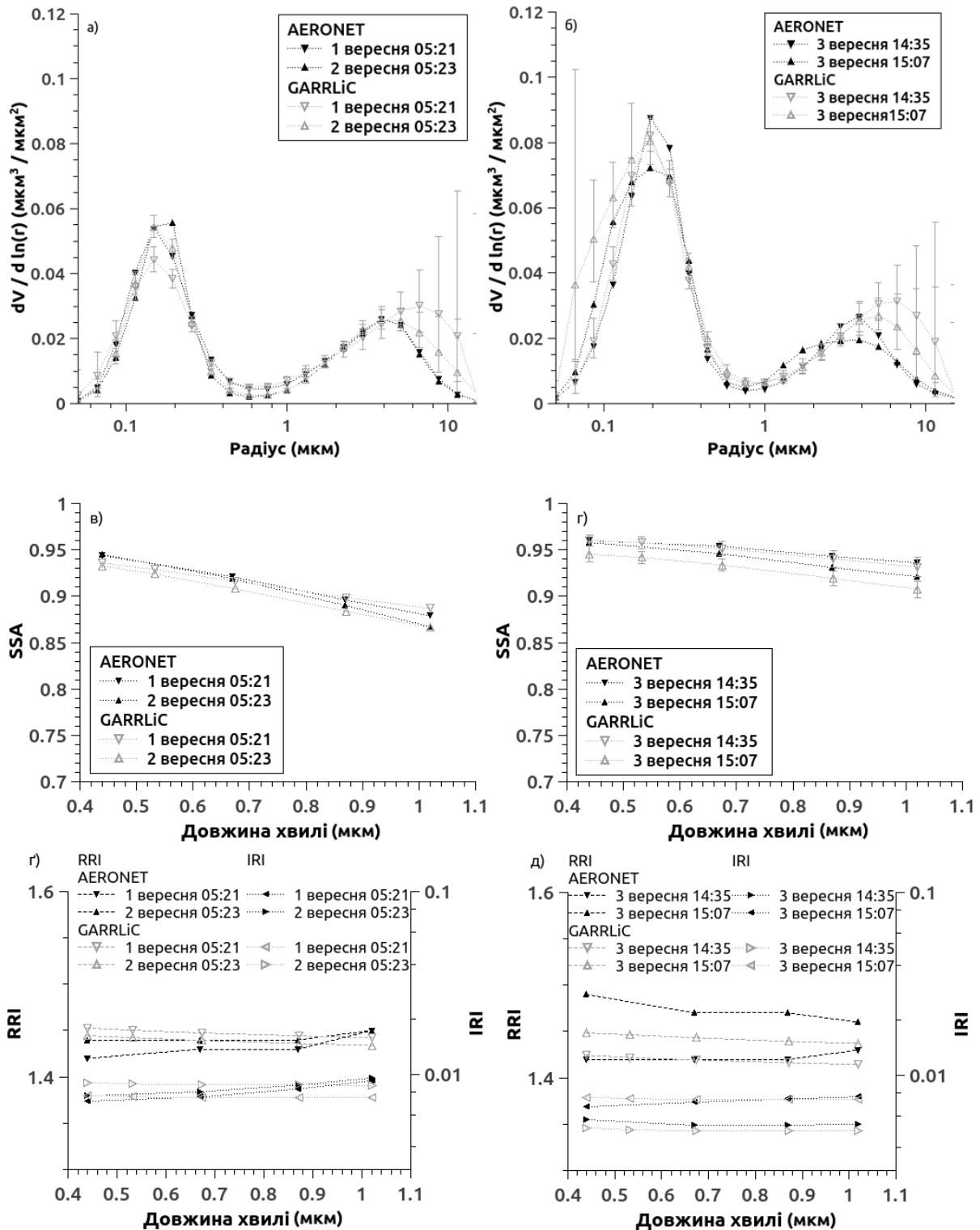


Рис. 3. Відтворені параметри аерозольних частинок за допомогою алгоритму GARRLiC (сірий колір) та AERONET (чорний колір, ці ж самі спостереження сонячних фотометрів): а) та б) – розподіл за розміром до та під час інтенсивної події відповідно; в) та г) SSA – спектральне альbedo одноразового розсіяння ( $\omega_0$ ) до та під час події відповідно; е) та д) — спектральний комплексний показник заломлення (RRI – дійсна частина комплексного показника заломлення, IRI – уявна частина комплексного показника заломлення) до та під час події.

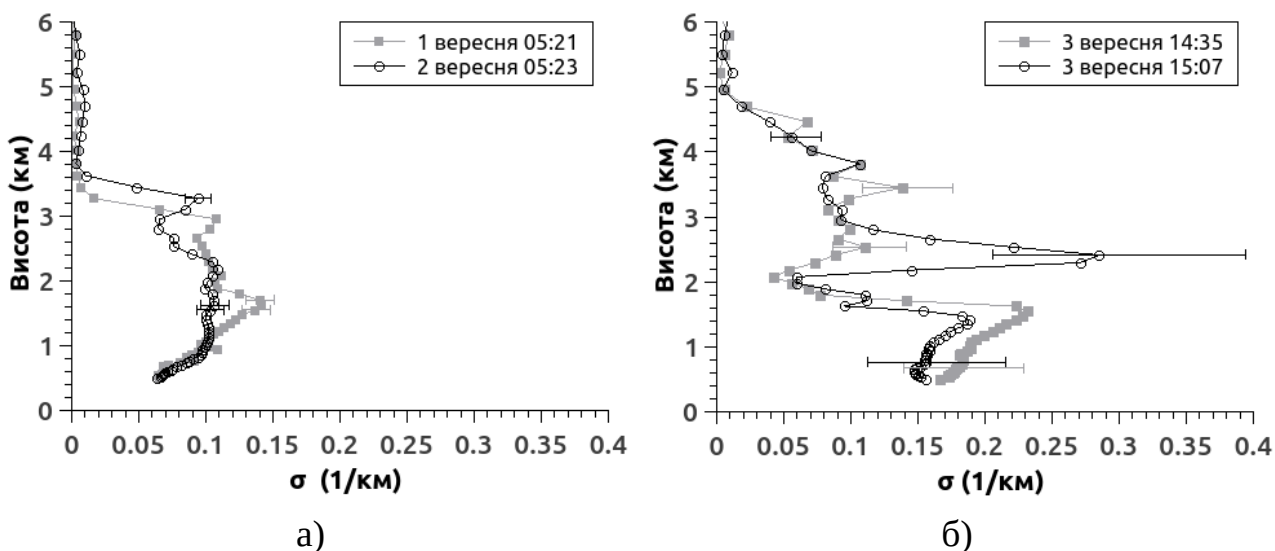


Рис. 4. Вертикальний розподіл коефіцієнта екстинкції, відтворений алгоритмом GARRLiC з одночасних вимірювань сонячного фотометра та лідара – а) та б) до та під час інтенсивної події відповідно.

У четвертому розділі “Радіаційний форсинг, спричинений різним вмістом аерозолів” знайдено радіаційний форсинг, спричинений різним вмістом аерозолів, що є кількісною оцінкою впливу останніх на енергетичний баланс кліматичної системи Землі. Результати отримано за допомогою алгоритму GAME для станції AERONET Київ. Алгоритм GAME (Global Atmospheric Model) моделює перенос випромінювання в атмосфері Землі. Він був створений для швидких і точних обчислень потоків сонячного випромінювання із урахуванням його поглинання і розсіювання різними складовими атмосфери для різних просторових масштабів. Радіаційні потоки, яскравість і швидкість нагрівання середовища можуть бути обчислені за програмою GAME для кожного рівня атмосфери у спектральному діапазоні від 0.2 до 4 мкм у припущенні вертикально неоднорідної атмосфери, розділеної на 50 плоских однорідних шарів.

Алгоритм GAME включає також розрахунки молекулярного і аерозольного розсіювання. Щоб застосувати алгоритм, необхідно для кожного атмосферного шару знайти оптичну товщину газового поглинання, а також параметри молекулярного і аерозольного розсіювання, такі як моменти фазової функції, альbedo одноразового розсіювання і оптичну товщу аерозолів.

Знайдено, що прямий радіаційний форсинг в залежності від вмісту аерозолів є від’ємним і знаходиться у діапазоні  $-6 \div -40$  Вт/м<sup>2</sup>. Отже, величина радіаційного форсингу, спричиненого аерозолями на верхній межі атмосфери, є від’ємною, тобто присутність аерозолів в атмосфері (тропосфері) сприяє її охолодженню.

Визначений прямий радіаційний форсинг на верхній межі атмосфери змінюється протягом року від від’ємного  $-10 \div -16$  Вт/м<sup>2</sup> у квітні–листопаді до



додатного  $2 \div 15 \text{ Вт/м}^2$  у грудні–лютому (рис. 5б). Позитивні значення узимку відбуваються завдяки змінам альbedo підстилаючої поверхні, пов'язаним зі сніговим покривом, що збільшує кількість відбитого назад випромінення від поверхні Землі, та збільшенню через опалювальний сезон кількості карбонатних аерозолів, що поглинають випромінення.

Для порівняння наведено значення РФ на інших станціях спостережень AERONET (рис. 5а). Значення, отримані для Києва, характерні і для інших станцій в Європі (Мінськ, Молдова, Москва, Мюнхен), менші, ніж у Мауна-Лоа та Канберра, та значно вищі, ніж у великих промислових містах Китаю (Пекін та Тайху).

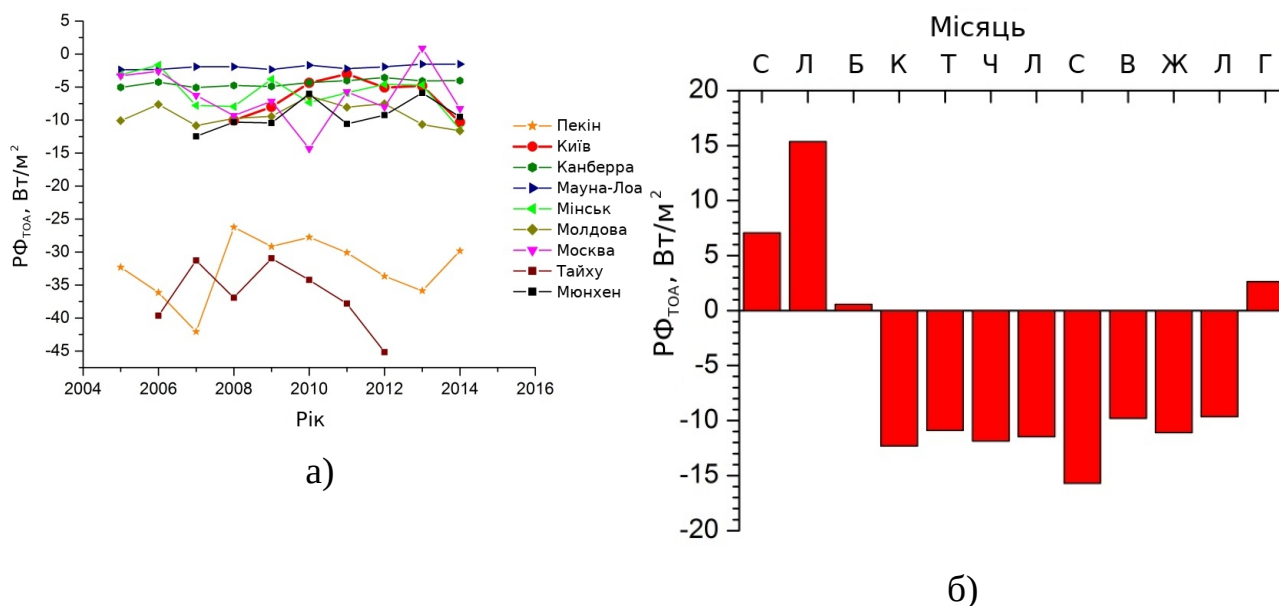


Рис. 5. Прямий РФ на верхній межі атмосфери: а) щорічно усереднені значення над деякими станціями AERONET у світі; б) сезонні зміни протягом 2008 – 2014 рр.

Завдяки лідарним дослідженням, які дозволили отримати дані про розподіл аерозолів за висотою, за розрахунками програми GAME отримано значення РФ на різних висотах атмосфери. Оцінки радіаційного форсингу з присутністю аерозолів за алгоритмом GAME були розраховані для трьох випадків. Були вибрані значення АОТ (440 нм), що дорівнюють 0.8 (максимальна забрудненість повітря), 0.1 (мінімальна забрудненість) та 0.4 (випадок задимленості від пожеж у Києві у вересні 2015 р.). Результати розрахунку для АОТ (440нм) 0.1, 0.4 та 0.8 наведені на рис. 6.

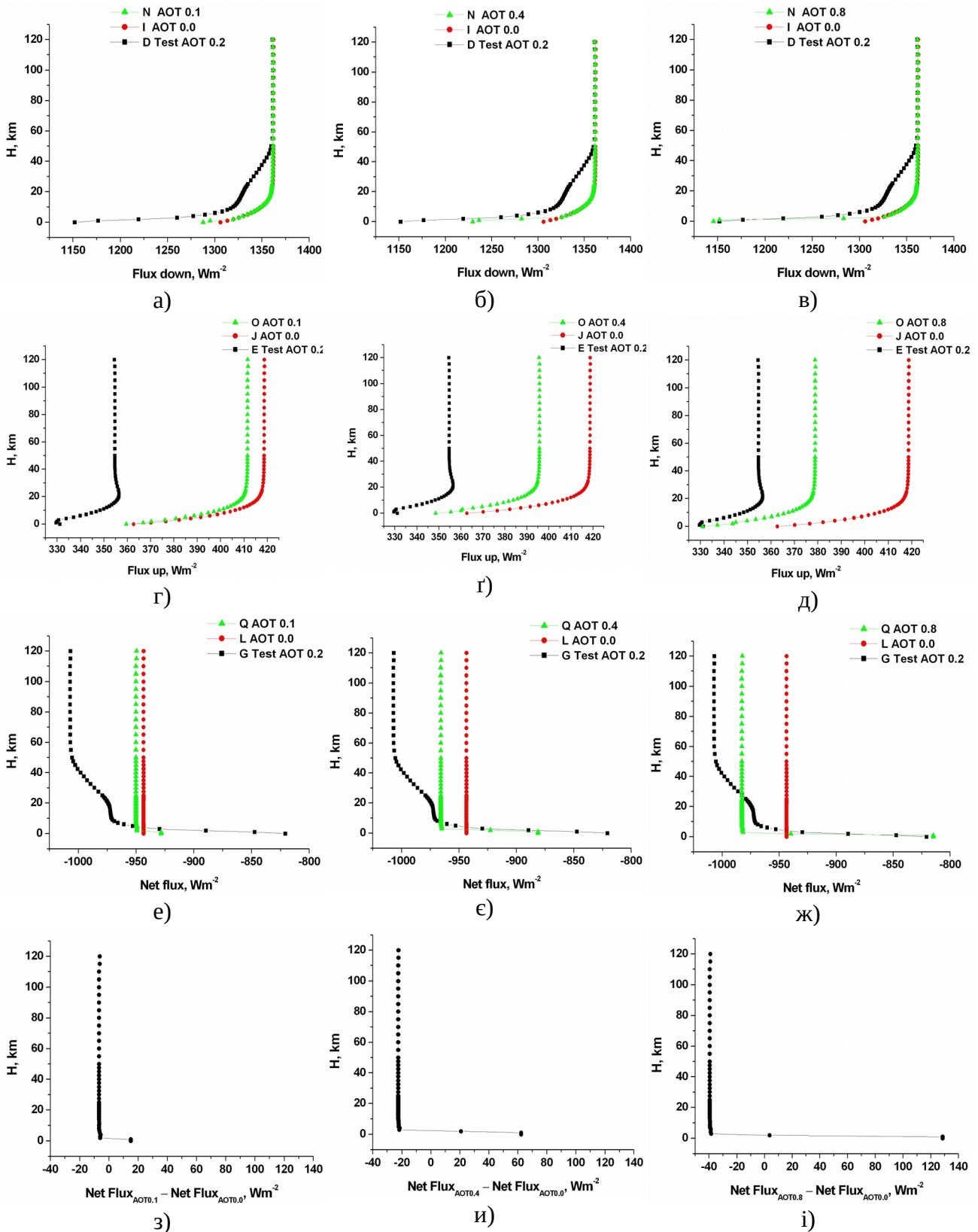


Рис. 6. Розрахунки за програмою GAME переносу потоків сонячного випромінювання (а-в) вниз до поверхні Землі, (г-д) від поверхні вгору, (е-ж) різниця потоків з висотою та (з-і) різниця потоків з аерозолями і без присутності аерозолів в атмосфері (AOT = 0.1, 0.4 та 0.8). Чорним (а-ж) показано значення переносу потоків випромінювання з усіма компонентами атмосфери та з фоновим значенням AOT, рівним 0.2.

У випадку максимальної забрудненості повітря, яка спостерігалась у серпні 2010 року під час торф'яних пожеж на півночі від Москви, величина радіаційного форсингу досягала значень  $-40 \text{ Вт/м}^2$ . Під час забруднення від пожеж на півночі та заході від Києва у вересні 2015 р. радіаційний форсинг дорівнював  $-22 \text{ Вт/м}^2$ . У випадку чистого повітря, коли АОТ близько 0.1, значення аерозольного радіаційного форсингу дорівнює  $-6 \text{ Вт/м}^2$ . В усіх випадках величина радіаційного форсингу, спричиненого аерозолями на верхній межі атмосфери, є від'ємною, тобто присутність аерозолів в атмосфері сприяє її охолодженню. Також на рис. 6 показано значення РФ з усіма компонентами атмосфери з фоновим значенням АОТ, рівним 0.2. Бачимо, що РФ у шарі аерозолів додатний (показує поглинання випромінення ними), а значення РФ над шаром аерозолів від'ємне та не змінюється.

Отримані за програмою GAME значення РФ відповідають даним про аерозольний радіаційний форсинг AERONET.

У додатку наводиться список опублікованих праць та відомості про апробацію результатів.

## ВИСНОВКИ

Основні наукові та практичні результати полягають у наступному:

1. Альbedo одноразового розсіяння та комплексний показник заломлення аерозолів були вперше проаналізовані для виявлення сезонної поведінки мікрофізичних параметрів аерозолів (спостережний пункт Київ). Знайдені значення та спектральні залежності альbedo одноразового розсіяння та показника заломлення відповідають суміші індустриальних аерозолів, пилу та продуктів горіння біомаси.

2. Вперше було проведено розділення аерозолів за типами в атмосфері над Києвом за допомогою кластерного аналізу шляхом побудови точкових діаграм залежностей різних параметрів аерозолів.

3. Визначено, що в зимові місяці спостерігаються індустриальні аерозолі з малою присутністю пилу; протягом весняних місяців спостерігаються індустриальні аерозолі з пилом та малою часткою продуктів горіння біомаси; протягом літніх місяців переважають індустриальні аерозолі, а також спостерігаються частинки спаленої біомаси; протягом осені переважають індустриальні аерозолі та змішаний тип аерозолів, проте також спостерігається не класифікований тип аерозолів в сегменті значень близьких до  $1.5 \text{ (AE(440 - 675 nm) - AE(675 - 870 nm))}$  та  $1.5 \text{ AE (440 - 870 nm)}$ .

4. Вперше за допомогою лідарних спостережень визначено висотний розподіл аерозолів і їх варіації в атмосфері над Києвом. Відтворені параметри аерозолів (АОТ, RRI, IRI) за алгоритмом GARRLiC добре узгоджуються з відповідними параметрами, визначеними за алгоритмом AERONET.

Отримані дані висотного розподілу мають значне практичне значення для планування калібрувальних процедур космічного експерименту Аерозоль-УА.

5. Визначено прямий радіаційний форсинг на верхній межі атмосфери, який змінюється протягом року від від'ємного  $-10 \div -16$  Вт/м<sup>2</sup> з квітня по листопад місяць до додатного  $2 \div 15$  Вт/м<sup>2</sup> у грудні–лютому.

Величина радіаційного форсингу, спричиненого аерозолями на верхній межі атмосфери, є від'ємною, тобто присутність аерозолів в атмосфері (тропосфері) сприяє її охолодженню.

## СПИСОК ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### У реферованих наукових журналах:

1. Бовчалюк В., Міліневський Г., Данилевський В., Голуб Ф., Сосонкін М., Юхимчук Ю., Подвін Т. (2017). Властивості аерозолю в атмосфері над Києвом за лідарними та фотометричними спостереженнями. *Космічна наука і технологія*, 23(6), 34-45.

2. Bovchaliuk, V., Bovchaliuk, A., Milinevsky, G., Danylevsky, V., Sosonkin, M., Goloub, Ph. (2013). Aerosol Microtops II sunphotometer observations over Ukraine. *Advances in Astronomy and Space Physics*, 3(1), 46–52.

3. Bovchaliuk, V., Goloub, Ph., Podvin, T., Veselovskii, I., Tanre, D., Chaikovsky, A., Dubovik, O., Mortier, A., Lopatin, A., Korenskiy, M., Victori, S. (2016). Comparison of aerosol properties retrieved using GARRLiC, LIRIC, and Raman algorithms applied to multi-wavelength lidar and sun/sky-photometer data. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(7), 3391–3405.

4. Kabashnikov, V., Milinevsky, G., Chaikovsky, A., Miatselskaya, N., Danylevsky, V., Aculinin, A., Kalinskaya, D., Korchemkina, E., Bovchaliuk, A., Pietruczuk, A., Sobolewsky, P., Bovchaliuk, V. (2014). Localization of aerosol sources in East-European region by back-trajectory statistics. *International Journal of Remote Sensing*, 35(19), 6993–7006.

5. Miatselskaya, N., Kabashnikov, V., Milinevsky, G., Chaikovsky, A., Danylevsky, V., Bovchaliuk, V. (2016). Atmospheric aerosol distribution in the Belarus-Ukraine region by the GEOS–Chem model and AERONET measurements. *International Journal of Remote Sensing*, 37(14), 3181–3195.

6. Milinevsky, G., Danylevsky, V., Bovchaliuk, V., Bovchaliuk, A., Goloub, Ph., Dubovik, O., Kabashnikov, V., Chaikovsky, A., Miatselskaya, N., Mishchenko, M., Sosonkin, M. (2014). Aerosol seasonal variations over urban-industrial regions in Ukraine according to AERONET and POLDER measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, 7(5), 1459–1474.

7. Milinevsky, G. P., Danylevsky, V. O., Grytsai, A. V., Evtushevsky, O. M., Kravchenko, V. O., Bovchaliuk, A. P., Bovchaliuk, V. P., Sosonkin, M. G., Goloub, Ph., Savitska, L. Y., Udodov, E. V., Voytenko, V. P. (2012). Recent developments of atmospheric research in Ukraine. *Advances in Astronomy and Space Physics*, 2(2), 114–120.

**У матеріалах та тезах конференцій:**

8. Бовчалюк А.П., Милиневский Г.П., Данилевский В.А., Сосонкин М.Г., Голуб Ф., Бовчалюк В.П. (2012). Динамика атмосферного аэрозоля над территорией Украины по данным спутникового поляриметра POLDER/PARASOL. Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические эффекты: труды XVI Международной школы-конференции молодых ученых, 1, 70–73.

9. Метельская Н.С., Кабашников В.П., Чайковский А.П., Милиневский Г.П., Данилевский В.А., Бовчалюк В.П., Бовчалюк А.П. (25 – 29 травня 2015). Оценка содержания аэрозоля в атмосфере над территорией Беларуси и Украины по данным измерений и моделирования. Міжнародна наукова конференція “Астрономія та фізика космосу в Київському університеті”, Україна, Київ, 87–88.

10. Метельская Н.С., Кабашников В.П., Чайковский А.П., Милиневский Г.П., Данилевский В.А., Бовчалюк В.П., Бовчалюк А.П. (27 – 30 травня 2014). Распределение атмосферного аэрозоля в Белорусско-Украинском регионе. Міжнародна наукова конференція Астрономія та фізика космосу в Київському університеті, Україна, Київ, 101.

11. Bovchaliuk, A. P., Bovchaliuk, V. P., Milinevsky, G. P., Danylevsky, V. O., Goloub, Ph., Voytenko, V. P. (2012, September 3 – 7). Dynamics of atmospheric aerosol over Ukraine during extreme wildfires. 12th Ukrainian conference on space research, Ukraine, Yevpatoria.

12. Bovchaliuk, V. P. (2011). Aerosol optical thickness over some Ukrainian regions by the Microtops II measurement. International Conference dedicated to 90-th Anniversary of P.R. Romanchuk, Ukraine, Kyiv.

13. Bovchaliuk, V. P. (2012, April 23 – 28). Analysis of aerosol characteristics over Ukraine by Microtops II sunphotometer measurements. 19th Open Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics, Ukraine, Kyiv, April 23 — 28.

14. Bovchaliuk, V. P. (2012, May 22 – 25). Microtops II aerosol data processing. Astronomy and Space Physics in Kyiv university, International conference in memory of A.V. Mandzhos, Ukraine, Kyiv.

15. Bovchaliuk, V. P. (2013, April 22 – 27). Variability of the aerosol characteristics by transect observation over Ukraine. 20th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics, Ukraine, Kyiv.

16. Milinevsky, G. P., Danylevsky, V. O., Bovchaliuk, A. P., Bovchaliuk, V. P., Sosonkin, M. G., Goloub, Ph., Voytenko, V. P. (2012). Aerosol dynamics in Ukraine

atmosphere by groundbased sunphotometer and satellite measurements. International Conference “Astronomy and Space Physics” dedicated to the memory of A.V. Mandzhos, Ukraine, Kyiv.

17. Yatskiy, Ya., Degtyaryov, O., Milinevsky, G., Syniavskiy, I., Mishchenko, M., Rozenbush, V., Ivanov, Yu., Bovchaliuk, A., Sosonkin, M., Danylevsky, V., Udodov, E., Bovchaliuk, V. (2015, May 25 – 29). Aerosol remote sensing in the terrestrial atmosphere. Міжнародна наукова конференція “Астрономія та фізика космосу в Київському університеті”, Україна, Київ.

## АНОТАЦІЯ

**Бовчалюк В. П. Фотометричні та лідарні дослідження аерозолів в атмосфері над Україною. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 05.07.12 – дистанційні аерокосмічні дослідження (104 – фізика та астрономія). Київський національний університет імені Тараса Шевченка МОН України, Київ; Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ, 2019.

Альbedo одноразового розсіяння та комплексний показник заломлення були вперше проаналізовані для виявлення сезонної поведінки мікрофізичних параметрів. Значення та спектральна зміна альbedo одноразового розсіяння та комплексного показника заломлення відповідають суміші індустриальних аерозолів, спаленої біомаси та пилу. Для визначення характерних типів аерозолів по сезонам були побудовані точкові діаграми для їх подальшої класифікації.

Вперше були проведені лідарні спостереження висотного розподілу аерозолів. Відтворені параметри за алгоритмом GARRLiC добре узгоджуються з відповідними параметрами аерозолів, визначеними за алгоритмом AERONET. Знайдений вертикальний розподіл коефіцієнта екстинкції.

Прямий радіаційний форсинг (РФ), розрахований як за версією AERONET, так і за алгоритмом GAME, є від’ємним. Отже, аерозолі викликають охолодження атмосфери (тропосфери), хоча протягом зимових місяців ця величина стає додатною. Знайдено вертикальний розподіл РФ завдяки лідарним спостереженням.

Отримані результати роботи можуть використовуватися в різних областях науки, таких як прогнозування метеорологічних умов забруднення, для уточнення значення радіаційного форсингу земної атмосфери у кліматології.

**Ключові слова:** аерозолі, атмосфера, аерозольна оптична товща, аерозольна оптична глибина, показник Ангстрема, варіації аерозолів, класифікація аерозолів, сонячний фотометр, зворотна траєкторія, кластерний аналіз, лідар, лідарні спостереження, радіаційний форсинг, GARRLiC, GAME.

## ANNOTATION

**Bovchaliuk V. P. Photometric and lidar studies of aerosols in the atmosphere over Ukraine – Qualified scientific work on the rights of the manuscript.**

Thesis for the candidate of science degree in physics and mathematics, specialty 05.07.12 – remote aerospace research (104 – Physics and Astronomy). Taras Shevchenko National University of Kyiv, MES of Ukraine, Kyiv; The Main Astronomical Observatory of the NAS of Ukraine, Kyiv, 2019.

The thesis is devoted to the study of the physical and microphysical properties of atmospheric aerosols over Ukraine by means of ground and satellite observations.

Objectives and problems of the work are defined in the preface. Also, it includes description of the means for problem solving. The scientific novelty of the work and the practical significance of the obtained results are substantiated in this section too.

The first section provides an overview of aerosol types, their effects on climate, the physical and microphysical properties of aerosols and ground based passive and active remote sensing methods for aerosols measurements. Also, it includes description of main advantages of use of lidar and the AERONET terrestrial photometer network observations. Lidar principle, types and algorithms are considered too. The GARRLiC algorithm, as the one which was used for lidar data analysis, is emphasized. The definition of radiative forcing and description of GAME algorithm is presented. Brief historical data of aerosol characteristics over Ukraine in the 1950-2000s are presented too. An overview summarizes that seasonal variation of aerosol characteristics (especially microphysical characteristics and vertical distribution of aerosols) are not enough studied for correct assessments of its impact on climate change on a regional and global scale. Hence, this work is devoted to study missed data for more accurate radiative forcing assessments. Further sections of the work present data analysis and its summary.

A comparison of the aerosol optical thickness (AOT) between the AERONET and POLDER data show that the POLDER AOT (865 nm) values are lower than the corresponding AERONET AOT (870 nm) values. This is due to the fact that the POLDER data are mainly determined by fine aerosol fraction, whereas the AERONET data includes both fractions, fine and coarse. Two AOT maxima were found in early spring and late summer (it agrees with other research). The single-scattering albedo (SSA) and the complex refractive index (CRI) were analyzed to find the seasonal behavior of microphysical parameters. The values found and the spectral dependence of SSA and CRI correspond to a mixture of industrial, biomass burning aerosols and dust.

Aerosol types were classified using two methodologies for all seasons. The first one uses interdependence between SSA and EAE (so called extinction Angstrom exponent, it is Angstrom exponent obtained using extinction coefficients). The second one uses relationship between AE and AE difference: AE (440 – 870 nm) and AE (440 – 675 nm) –

AE(675 – 870 nm). This method was developed because of low accuracy of retrieved SSA and volume distribution by AERONET algorithm. First method showed that over Kyiv city there are urban industrial and biomass burning aerosols. Using second method it was determined that during winter there are urban industrial aerosols with a low presence of dust; during spring there are urban industrial type of aerosols with dust and a small fraction of the biomass burning particles; during summer urban industrial (prevails) and biomass burning aerosols are observed; and during autumn, urban industrial aerosol and a mixed type of aerosol are observed, however, an unclassified aerosol type is also observed in the segment of values close to 1.5 (AE (440–675 nm) - AE (675–870 nm)) and 1.5 AE (440–870 nm).

Aerosol altitude distribution was obtained over Ukraine region for the first time. Observations of the CIMEL370 monochromatic lidar and GARRLiC algorithm were used. Aerosol parameters retrieved using GARRLiC algorithm in good agreement with the corresponding parameters (AOT, real (RRI) and imaginary (IRI) part of refractive index) obtained by AERONET algorithm. A vertical distribution of the extinction coefficient was also found for a significant air pollution which happened of the beginning of September of 2015 in Kyiv city. During 1 and 2 September (normal atmospheric conditions) extinction coefficient increases from 0.05 to 0.10  $\text{km}^{-1}$  in the altitude range from 0.5 to 1.0 km and stay stable with mean value 0.1  $\text{km}^{-1}$  in the altitude range from 1.0 to 4.0 km. Load and vertical distribution of aerosol extinction changed during pollution event. In the lower layer (0.5 – 1.5 km range) aerosol load increases from 0.15 to 0.20  $\text{km}^{-1}$  and in the range of 1.5 – 5.0 km a cloud of aerosol particles was observed with a high variation of extinction coefficient (from 0.05 to 0.30  $\text{km}^{-1}$ ).

Aerosol radiation forcing (RF) in the top of the atmosphere, determined from observations in Kyiv, was calculated by AERONET and GAME algorithms. Data shows that RF is negative during spring-autumn months over Kyiv (Ukraine) region although during the winter months this value becomes positive (from 2 to 15  $\text{W}/\text{m}^2$ ). It happens due to changes in the albedo of the underlying surface associated with the snow cover and increasing number of carbonaceous aerosols due to heating season.

RF vertical distribution was found for the first time thanks for lidar observations and the GAME algorithm. It was calculated for different aerosol load (0.1, 0.4 and 0.8 AOT at 440 nm). Obtained results show that RF on top of the atmosphere is negative and varies from –6 to –40  $\text{W}/\text{m}^2$  depending on aerosol load.

The obtained results of the work can be used in various fields of science, such as forecasting meteorological conditions of contamination, in the medical field, for more accurate modeling of physicochemical processes in the Earth's atmosphere, and for clarifying the overall radiative forcing of the Earth's atmosphere in climatology. Also, obtained aerosol vertical distribution is important for the planning of the aerosol-UA space experiment calibration procedures.



**Key words:** aerosol, atmosphere, aerosol optical thickness, aerosol optical depth, Angstrom index, aerosol variations, aerosol classification, solar photometer, back-trajectory, cluster analysis, lidar, lidar observations, radiation forcing, GARRLiC, GAME.

## АННОТАЦИЯ

**Бовчалюк В. П. Фотометрические и лидарные исследования аэрозолей в атмосфере над Украиной. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.07.12 – дистанционные аэрокосмические исследования (104 – физика и астрономия). Киевский национальный университет имени Тараса Шевченка МОН Украины, Киев; Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев, 2019.

Альbedo одноразового рассеяния SSA и комплексный показатель преломления были впервые проанализированы для выявления сезонного поведения микрофизических параметров. Найденные значения и спектральная зависимость SSA и показателя преломления соответствуют смеси индустриального аэрозоля, продуктов горения биомассы и пыли. Для выделения типов аэрозоля по различным сезонам были построены точечные диаграммы для их дальнейшей классификации.

Впервые в Украине проведены лидарные наблюдения высотного распределения аэрозоля. Воспроизведенные параметры аэрозоля по алгоритму GARRLiC хорошо согласуются с соответствующими параметрами, определенными по алгоритму AERONET. Найдено вертикальное распределение коэффициента экстинкции.

Прямой радиационный форсинг (РФ), рассчитанный как по версии AERONET, так и по алгоритму программы GAME, является отрицательным. Такой аэрозоль вызывает охлаждение атмосферы (тропосферы), хотя в течение зимних месяцев эта величина становится положительной. Найдено вертикальное распределение РФ благодаря лидарным наблюдениям.

Полученные результаты работы могут использоваться в различных областях науки, таких как прогнозирование метеорологических условий загрязнения атмосферы, для уточнения значения радиационного форсинга земной атмосферы в климатологии.

**Ключевые слова:** аэрозоль, атмосфера, аэрозольная оптическая толща, аэрозольная оптическая глубина, показатель Ангстрема, вариации аэрозолей, классификация аэрозолей, солнечный фотометр, обратная траектория, кластерный анализ, лидар, лидарные наблюдения, радиационный форсинг, GARRLiC, GAME.