УДК 551.510.42

А. П. Бовчалюк

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

ВПЛИВ ПОЖЕЖ НА РОЗПОДІЛ АЕРОЗОЛЮ НАД УКРАЇНОЮ ЗА ДАНИМИ СУПУТНИКОВИХ ТА НАЗЕМНИХ ВИМІРЮВАНЬ

Аналізуються джерела надходження та транспортування аерозолів з лісових, степових, торф'яних і сільськогосподарських пожеж над Україною у період 2002—2012 років. Для характеристики розподілу аерозолю в атмосфері та візуалізації місць горіння на поверхні Землі використано дані супутникових приладів POLDER/PARASOL та MODIS відповідно, а за допомогою моделі HYSPLIT побудовано кластери зворотних траєкторій руху повітряних мас. Для аналізу об'ємного розподілу частинок за розміром над Києвом протягом 2008—2012 років використано дані всесвітньої мережі сонячних фотометрів AERONET. Найвищі значення аерозольної оптичної товщини (AOT) 0.4—0.7 для спектрального каналу 865 нм, спричинені пожежами на торфовищах центральноєвропейської частини Росії, були зареєстровані у період з 14 по 16 серпня 2010 р. над східною та центральною частиною України. Джерела надходження продуктів горіння у цей період знаходилися на більшій відстані від Києва, ніж у серпні 2008 р., коли пожежі відбувалися в центральних та південних областях України. Середньомісячне значення АОТ на рівні 0.05—0.08 спостерігалося над північною і центральною Україною внаслідок степових пожеж у Білорусі з квітня по травень 2006 р. Визначено, що транскордонний перенос атмосфери грає важливу роль у розподілі аерозолю і впливає на якість повітря над всіма країнами Східної Європи. Під час пожеж радіус аерозольних частинок дрібнодисперсної фракції, який відповідає максимумові розподілу по розмірах, над Києвом дорівнював 0.2—0.25 мкм, що може свідчити про одночасну наявність індустріального аерозолю і продуктів горіння біомаси. Крім того, спостерігається подвійний максимум розподілу крупнодисперсної фракції з квітня по червень, що можна пояснити сезонною природою походження частинок. Об'ємний розподіл аерозолів за розмірами у травні—липні 2012 р. характеризується найбільшою наявністю дрібнодисперсних частинок у порівнянні з цим же періодом інших років.

ВСТУП

Аерозолі впливають на радіаційний баланс земної атмосфери і тому є одним з найважливіших факторів, що впливають на клімат в регіональному та глобальному масштабах. Аерозольні частинки різноманітні за формою, хімічним складом та розмірами і поділяються на дві фракції — дрібнодисперсну (розміри від 0.01 до 1 мкм) та крупнодисперсну (від 1 до 100 мкм). Аерозолі утворюються як під час природних процесів (лісові пожежі, морська поверхня та шторми, пустельні бурі, ерозія земної поверхні і виверження вулканів), так і антропогенних (промисловість, транспорт, видобування природних ресурсів, спалювання біомаси та палива, вирубка лісів та ін.) [15]. Дослідженням вмісту аерозолю у земній атмосфері, його динаміки, фізичної природи і характеристик частинок приділяється значна увага у багатьох країнах світу, проте на сьогоднішній день оцінки впливу аерозолю на енергетичний баланс Землі мають великі похибки і потребують комплексного підходу для поліпшення результатів [29].

Відомо, що аерозолі впливають на формування клімату за рахунок прямого ефекту, тобто розсіювання та поглинання сонячного випромінювання, та непрямого, коли ці частинки у верхніх шарах атмосфери можуть ставати ядрами конденсації водяної пари і таким чином впливати на інтенсивність утворення хмар, зміну висоти та часу існування хмарних утворень [29, 44]. Розподіл аерозольних частинок в атмосфері дуже неоднорідний у просторі і часі. Доволі швидко змінюються і оптичні характеристики аерозольного шару, як в регіональному, так і в глобальному масштабах [61].

[©] А. П. БОВЧАЛЮК, 2013

Для досліджень глобального розподілу вмісту аерозолю і його кліматичних характеристик використовують прилади космічного базування. Супутникові прилади накопичують дані про параметри атмосфери над усією земною кулею, однак оцінити точність цих даних (особливо над сушею) дуже складно внаслідок необхідності точно враховувати оптичні характеристики земної поверхні різних типів, що змінюються з часом внаслідок сезонів та людської діяльності. Характеристики аерозольних частинок за даними вимірювань супутникових приладів у більшості випадків визначаються шляхом розв'язування оберненої задачі. Така задача є некоректно поставленою, і розв'язок її може мати декілька варіантів, оскільки кількість незалежних частин даних за одну сцену вимірювань не перевищує кількості невідомих модельних параметрів. Відновлення параметрів аерозольних частинок запропоновано в українському проекті «Аерозоль-UA» за рахунок перевищення кількості незалежних вимірювань над модельними параметрами, що забезпечить надлишкову систему рівнянь [3]. Це має бути досягнуто завдяки точним і стабільним фотометричним та поляриметричним вимірюванням, а також великою кількістю та діапазоном кутів, під якими здійснюються спостереження кожної ділянки на поверхні Землі. Тому проект «Аерозоль-UA» спрямований на створення надійної бази детальних оптичних, хімічних, мікро- та макрофізичних властивостей аерозольних і хмарних частинок, що дозволить радикально покращити модельну параметризацію аерозолю, виявити джерела та механізми перенесення, описати процеси взаємодії з іншими компонентами атмосфери, отримати надійні кількісні оцінки прямого і непрямого аерозольних ефектів та їхнього внеску в енергетичний баланс кліматичної системи [47, 48]. На сьогоднішній день глобальні характеристики аерозолю над сушею, отримані шляхом мінімізації різниці виміряних параметрів з модельними характеристиками, доступні з приладів, що перебувають на полярних орбітальних супутниках: MODIS, MERIS, MISR, AVHRR, POLDER, TOMS i OMI [38, 39, 49]. Проте отримані характеристики аерозолю з цих приладів потребують детальнішого порівняння з наземними даними сонячних фотометрів, бо за однією характеристикою (наприклад, аерозольною оптичною товщиною AOT) не можна адекватно оцінити точність супутникових приладів [43, 49, 50]. Тому нижче ми будемо використовувати дані, отримані наземними та супутниковими приладами для кращого опису властивостей частинок.

Автори класифікації властивостей поглинання аерозолю за даними мережі AERONET характеризують територію України як джерело індустріальних аерозолів [32] відповідно до загальної класифікації типів цих частинок [24]. В країні зосереджені інші не менш значні джерела забруднення атмосфери: транспорт, інтенсивне сільське господарство, важка промисловість і видобування природних ресурсів з кар'єрів. Крім того, досліджувана територія характеризується великою кількістю лісових, степових, торф'яних та сільськогосподарських пожеж (http://www. ceip.at), внаслідок яких аерозолі як продукт спалення біомаси потрапляють у атмосферу і можуть переміщуватись на значні відстані [5, 6, 42, 44, 60, 64]. Так, аерозолі з пожеж на території Східної Європи можуть мати вплив на зміну клімату в Арктиці [53, 62, 63].

У даній роботі аналізуються випадки пожеж в Україні та сусідніх країнах, які супроводжувалися утворенням та переносом аерозолю над досліджуваною територією. Оскільки дані супутникового приладу POLDER/PARASOL [19, 66] добре відтворюють розподіл та характеристики дрібнодисперсної фракції аерозолю, якими звичайно є частинки продуктів горіння, тому використання вимірювань поляриметра POLDER дозволяє аналізувати параметри аерозолю від пожеж в одночасних вимірюваннях на значній території. Попередній аналіз дозволив виявити періоди підвищеної кількості пожеж на сході Європи у квітні-травні та серпні-вересні [9]. Ці події інтерпретуються як неконтрольовані лісові і степові пожежі, а також як спалювання біомаси в кінці сезону збирання сільськогосподарських культур. За аналізом даних із супутника MODIS у роботі [42] відзначається, що кількість сільськогосподарських пожеж в Україні зменшилася на 32 % у 2002 р. і на 87 % у 2003 р. у порівнянні з



Рис. 1. Кількість *N* пожеж та охоплена вогнем площа *S* за даними Національної доповіді про стан техногенної та природної безпеки в Україні [2]

2001 р. Крім того, за даними Національної доповіді про стан техногенної та природної безпеки Державної служби України з надзвичайних ситуацій [2] кількість пожеж та площа охоплених вогнем ділянок скорочувалися з 2007 по 2011 рр. (рис. 1). Однак у період 2002—2007 рр. внесок дрібнодисперсних аерозолів від пожеж в Україні у загальну кількість над Європою складав близько 30 % у квітні та 28 % у серпні [8]. В роботі аналізується вплив пожеж на розподіл аерозолю протягом останніх одинадцяти років.

МЕТОДИКА АНАЛІЗУ ТА ВИКОРИСТАНІ ДАНІ

Для візуалізації місць горіння у роботі використано дані супутникового приладу MODIS [30, 31, 37], розміщеного на борту супутників «Aqua» та «Terra», що входять до групи A-Train [7]. Ці дані відображають як мінімум одну пожежу протягом місяця, зареєстровану та оброблену алгоритмом з розміром пікселя в 1 км (рис. 2). Точності отримання розподілу пожеж та порівняння з результатами розподілу за даними супутникового радіометра ASTER наведено у роботах [51, 59].

З використанням моделі HYSPLIT Trajectory Model [22, 23, 55], були побудовані кластери зворотних траєкторій руху повітряних мас для аналізу перенесення аерозолю. Для цього були використані дані глобальної системи Global Data Assimilation System (GDAS1), які містять, зокрема, дві складові вітру, температуру, вологість. Просторова роздільна здатність таких даних складає 1° на поверхні Землі і за висотою поділена на 23 поверхні з тиском від 20 до 1000 гПа, а роздільна здатність за часом — 6 год (http://ready.arl.noaa. gov/gdas1.php). Завантажені дані були оброблені за стандартним алгоритмом моделі HYSPLIT [22, 23, 55] з кінцевою точкою на висоті 500 м над поверхнею для координат станції AERONET «Київ» $(50.36^\circ$ пн. ш., 30.50° сх. д.) о $12^{\rm h}$ UTC для кожного окремого дня. Після цього траєкторії протягом кожного місяця були згруповані методом кластеризації так, що відмінності між траєкторіями всередині кластера зводилися до мінімуму, в той час як відмінності між кластерами — до максимуму (http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php). При обчисленні траєкторії об'єднувались, допоки загальна дисперсія індивідуальних траєкторій відносно середньої траєкторії кластера не починала різко збільшуватися, що відбувалося, коли різні кластери об'єднувалися [4, 21, 56]. Шляхом ітерацій підбиралась оптимальна кількість кластерів для місячного набору траєкторій (рис. 4, 5). Цифри у дужках біля кожного кластера відповідають відношенню кількості траєкторій, що увійшли до нього, до загальної кількості траєкторій за відповідний місяць у відсотках. Наприклад, якщо місяць складається з 30 днів, то цифра 20 % біля кластера означає, що до нього увійшло шість траєкторій із 30. У попередній нашій роботі [1] за допомогою кластерного аналізу зворотних траєк-



Рис. 2. Карти усіх зареєстрованих пожеж за місяць за даними MODIS для: квітня 2003 р. (*a*), квітня 2005 р. (*б*), квітня 2006 р. (*в*), травня 2006 р. (*е*), липня 2011 р. (*д*), липня 2012 р. (*е*)

торій було виявлено, що у період 2008—2011 рр. з квітня по вересень включно у Києві спостерігається збільшена (як мінімум у 1.5 раза) кількість об'ємного вмісту дрібнодисперсного аерозолю у стовпі атмосфери, що пояснюється перенесенням частинок з індустріальних регіонів сходу України, західних регіонів Росії та сходу Польщі, а за спостереженнями у Севастополі в період 2006—2011 рр. — з Румунії, Північного Кавказу, центральних і східних регіонів України.

Для аналізу розподілу частинок за розмірами використовувались дані (Level 2.0) всесвітньої мережі сонячних фотометрів CIMEL CE-318 АЕRONET [35], українські пункти спостережень якої встановлені у Севастополі з травня 2006 р., в Києві з березня 2008 р. та у Луганську з листопада 2011 р. Восени 2011 р. була створена мобільна станція із сонячним фотометром CIMEL CE-318 [46], яка послідовно здійснювала вимірювання у Луганську, у центрі Києва, у Євпаторії та Донецьку. Загалом мережа AERONET нараховує понад 300 перманентних станцій по всій планеті, дані з яких обробляються за єдиним алгоритмом [25—27] і доступні через інтернет [http://aeronet. gsfc.nasa.gov/]. Є кілька модифікацій сонячного фотометра CIMEL CE-318, які забезпечують ви-

мірювання спектральної АОТ в діапазоні 340-1650 нм. При цьому похибки вимірювань АОТ не перевищують ±0.01 у видимому та інфрачервоному діапазонах і ±0.02 — в ультрафіолетовому. Об'ємний розподіл аерозолю по розмірах, дійсна та уявна частина показника заломлення, спектральне альбедо одноразового розсіювання (SSA), фазова функція та фактор асиметрії частинок отримуються з вимірювань розподілу спектральної яскравості неба вздовж альмукантарата Сонця та з поляризаційних вимірювань шляхом розв'язування відповідної оберненої задачі [25—27]. Результати роботи станції AERONET у 2008—2011 рр. у Києві та характеристики аерозольних частинок представлені у роботах [17, 18, 46], де відзначається, що протягом досліджуваного періоду в атмосфері над Києвом переважали дрібнодисперсні частинки, а найбільше значення АОТ спостерігалося у серпні 2010 р.

Для досліджень просторового розподілу аерозолю в даній роботі використовуються дані поляриметра POLDER (POLarization and Directionality of the Earth's Reflectances) [19, 66], встановленого на борту супутнику PARASOL (Polarization and Anisotropy of Reflectances for Atmospheric Sciences coupled with Observations from a Lidar), що входить до групи супутників «А-Train» [7]. Конструкція і характеристики приладу POLDER викладені в роботах [20, 66]. Поляриметр має широке поле зору: ±51° вздовж і ±43° впоперек підсупутникової траси, що становить 2100 і 1600 км на поверхні Землі відповідно. Таке поле зору забезпечується об'єктивом, який будує зображення з роздільною здатністю 5.3 × 6.2 км на земній поверхні. Вимірювання здійснюються в дев'яти спектральних каналах у діапазоні довжин хвиль 440—1020 нм, три з яких (490, 670 і 865 нм) поляризаційні.

Вимірювання інтенсивності та ступеня лінійної поляризації розсіяного атмосферою і поверхнею Землі сонячного випромінювання з багатьох напрямів дозволяють за даними POLDER визначити фазову функцію та поляризаційні характеристики розсіювання аерозольними частинками, оцінити їхні розміри, а також визначити AOT. Ступінь поляризації розсіяного випромінювання чутливий до показника заломлення та форми аерозолів (точніше до відносного вмісту несферичних частинок), що забезпечує визначення функції розсіювання з більшою точністю [20]. Однак вимірювання у поляризованому світлі у спектральних каналах 670 і 865 нм чутливе до розсіювання в основному дрібнодисперсних аерозолів, і тому отримані параметри відображають властивості продуктів горіння та більшість антропогенних аерозолів [20, 28].

Стандартна методика вирішення оберненої задачі за даними поляриметра POLDER щодо властивостей аерозолів ґрунтується на підході LUT (Look-Up Tables) [20]. Інтенсивність розсіяного світла обчислюється для десяти моделей аерозольних частинок при логнормальному розподілу їх по розмірах з ефективним радіусом від 0.075 до 0.255 мкм, середнім показником заломлення m = 1.47 - 0.01i та показником Ангстрема (α) в межах від 1.8 до 3.0, який визначається за довжинами хвиль 670 і 865 нм. Останній параметр використовується для оцінки ефективного радіуса частинок у спостережуваному стовпі атмосфери: що більше значення α , то менші частки [20].

Названі вище параметри аерозолю визначалися з умови мінімуму суми квадратів нев'язок між виміряними та модельними значеннями інтенсивностей на довжинах хвиль 670 і 865 нм з урахуванням поляризаційної фазової функції. Оскільки поляриметр POLDER не виконує спеціальних вимірювань характеристик земної поверхні [20], для побудови двонапрямленої поляризаційної функції розподілу (BPDF — Bidirectional Polarization Distribution Function), яка використовується при визначенні характеристик аерозолю над сушею, у алгоритмі застосовуються емпіричні коефіцієнти, підібрані для різних класів земної поверхні відповідно до біотипів Міжнародної геосферно-біосферної програми (International Geosphere-Biosphere Programme) [52].

Обробка даних POLDER/PARASOL здійснювалась у три етапи [11—13]. Характеристики аерозолю визначались за усередненими елементами зображення поверхні розміром 3×3 пкл, тобто приблизно 16×18 км. Спектральна інтенсивність поляризованого світла (рівень даних 1), отримана в каналах 670 і 865 нм, використовувалась для обчислення параметрів аерозолю над безхмарними районами (рівень даних 2). У роботі використовувались усереднені за місяць (рівень даних 3) АОТ на довжині хвилі 865 нм. Точність визначення характеристик аерозолю була досліджена над океаном [33, 34] та над сушею, де кореляція з наземними станціями AERONET складає 0.77—0.95 у залежності від місця розташування станції [14, 28]. У роботі [9] проведено таке ж дослідження над Східною Європою, де кореляція для станції «Київ» складає 0.93 для дрібнодисперсних аерозолів.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА АНАЛІЗ

За даними Національної доповіді про стан техногенної та природної безпеки Державної служби України з надзвичайних ситуацій (рис. 1) на 2002 та 2007 рр. припадають піки кількості пожеж та охопленої вогнем площі. За нашим попереднім аналізом [9] були виявлені піки АОТ у квітні-травні та серпні-вересні, які можуть пояснюватись пожежами внаслідок сільськогосподарської діяльності та неконтрольованими лісовими пожежами. Відомо, що у 2003 р. в Європі була надзвичайно спекотна та суха погода [45], в результаті чого виникали численні лісові пожежі у Португалії, Іспанії, Франції, Італії, Греції, Румунії, Чехії, Словаччині та Молдові [57]. На рис. 2, а точками представлено пожежі, зареєстровані супутниковим приладом MODIS у квітні 2003 року, а на рис. 3, а показані карти розподілу середньомісячних характеристик АОТ, отримані за даними поляриметра POLDER/PARASOL за цей же період (рівень даних 3). Видно, що середньомісячне значення АОТ (рис. 3, а) в західних та центральних регіонах України мало вище значення у порівнянні зі східними.

За допомогою кластерного аналізу зворотних траєкторій було визначено п'ять напрямків руху повітряних мас до Києва на висоті 500 м над рівнем поверхні (рис. 4, a), з яких східний (23 %) та північний (27 %) у сумі складали половину всіх місячних зворотних траєкторій. Видно, що аерозолі з пожеж та продуктів горіння у Європі, Білорусії та Росії переміщувалися разом з повітряними масами над територією України. Крім того, з рис. 2, a видно, що окремі пожежі відбувалися також по всій території України з трохи більшою кількістю в центральних та північних областях. Повітряні маси рухалися із цих територій (рис. 4, *a*), а це означає, що в атмосферу над Києвом також потрапляли продукти горіння. Середньомісячне значення АОТ для спектрального каналу 865 нм протягом квітня 2003 року складало 0.06—0.08 над заходом і центром України та 0.03—0.06 над сходом України (рис. 3, *a*).

У 2004 р. зареєстровано незначну кількість лісових та сільськогосподарських пожеж (рис. 1), характерних місяців не було, а у 2005 р. кількість пожеж та охопленої вогнем площі була майже такою ж, як у 2003 р. Середньомісячні значення АОТ для квітня 2005 р. (рис. 3, б) складали 0.06— 0.1 (крім Криму та Одеської області). За аналізом кластерів зворотних траєкторій було визначено п'ять основних напрямів надходження повітряних мас до Києва (рис. 4, δ), половина з усіх траєкторій припадає на території, де відбувалися пожежі, які зафіксовані супутником MODIS (рис. 2, б). Із заходу та північного заходу рухалися повітряні маси з районів пожеж, що відбувалися в Угорщині, Польщі та Румунії [58]. Тому згідно з представленим аналізом у приземному шарі (500 м) над Києвом у квітні 2005 р. завжди спостерігались аерозолі продуктів горіння з різних регіонів, які негативно впливали на якість повітря. Утворені частинки з цих пожеж також рухалися на північ [53], де осідали на сніговому покриві в Арктиці, тим самим змінюючи його відбивні властивості.

Аномально висока температура в Арктиці спостерігалася також навесні 2006 р. [64], що пояснюється переносом продуктів горіння із сходу Європи. На острові Шпіцберген зареєстровано максимальну забрудненість повітря в кінці квітня — на початку травня 2006 р. [44]. На рис. 2, в, г показані численні пожежі у квітні та травні 2006 р. відповідно, що були зареєстровані приладом MODIS. Здебільшого ці пожежі відбувалися у Білорусії та західній Росії, проте у квітні пожежі також реєструвались по всій території України. Середньомісячне значення АОТ складало 0.06-0.09 у квітні (рис. 3, в) та 0.08-0.1 у травні (рис. 3, г) над Білоруссю, західними регіонами Росії та північчю Україною. Протягом цих пожеж у квітні-травні 2006 р. значення АОТ було



Рис. 3. Карти розподілу середньомісячних значень АОТ для: квітня 2003 р. (*a*), квітня 2005 р. (*б*), квітня 2006 р. (*в*), травня 2006 р. (*г*), липня 2011 р. (*д*), липня 2012 р. (*е*)

невисоке лише у північних регіонах України та Криму і складало 0.02—0.04. На рис. 4, *в*, *г* представлено кластери зворотних траєкторій руху повітряних мас до Києва для квітня та травня відповідно, де видно, що аерозолі рухалися саме з місць горіння.

Аномально висока температура (35-41 °C) та низьке значення відносної вологості (9-25 %) у серпні 2010 р. створили ідеальні умови для поширення лісових та торф'яних пожеж у Західній Росії [16, 41, 67]. З рис. 5, *а* видно, що середньомісячні значення АОТ у цьому регіоні досягали значення 0.3-0.5, що у 5-10 разів більше від звичайного сезонного значення. Через високу концентрацію продуктів горіння пожежі, зареєстровані за даними MODIS, мають дещо обмежений характер через відкидання даних, які не задовольняють розв'язок оберненої задачі. Тому рис. 5, δ відображає пожежі, котрі зареєстровані для погодних умов без диму в атмосфері над досліджуваною поверхнею. Добре помітні пожежі не тільки в Росії, але і на півночі та сході України, Молдові та півночі Румунії. Розрахунок кластерів зворотних траєкторій (рис. 5, e) дозволив визначити, що в атмосферу над Києвом потрапляли аерозолі різного типу, оскільки західні (21 %) та південно-західні (14 %) траєкторії повітряних мас приносили частинки антропогенного походження з Європи, північно-західні (17 %) — комбіновані аерозолі, що виникали в Румунії та Молдові,



Рис. 4. Кластери зворотних траєкторій над Києвом з кінцевою точкою на висоті 500 м та 12:00 для: квітня 2003 р. (*a*), квітня 2005 р. (*б*), квітня 2006 р. (*в*), травня 2006 р. (*е*), липня 2011 р. (*д*), липня 2012 р. (*е*)



Рис. 5. Карти розподілу середньомісячних значень АОТ з даних POLDER/PARASOL (*a*), зареєстровані пожежі за місяць по даним MODIS (*б*), кластери зворотних траєкторій над Києвом з кінцевою точкою на висоті 500 м та 12:00 кожного дня (*в*) та траєкторії 3-го (*г*) і 4-го (*д*) кластеру для серпня 2010 р.

які вміщують у своєму складі і продукти горіння, і індустріальні аерозолі. Крім того, майже половина (48 %) повітряних мас надходила з територій неконтрольованих пожеж (рис. 5, e, d) в Україні та Росії. Максимальні значення АОТ 0.4—0.7 над Києвом були зареєстровані у період 14—16 серпня, що збігається з результатами розрахунків зворотних траєкторій, представленими на рис. 5, e. До того ж АОТ на рівні 0.4—0.6 було зареєстроване портативним сонячним фотометром Місгоtops II у Луганську у цей самий проміжок часу [10]. Тому період з 14 по 16 серпня 2010 року вважається найбільш забрудненим продуктами горіння над східною та центральною частиною України за 2002—2012 рр.

У 2011 р. було зареєстровано найменшу кількість пожеж і пройдену вогнем площу (рис. 1) за весь розглянутий період [2]. Проте у липні супутником MODIS були зареєстровані пожежі на півдні України, в Криму і Молдові (рис. 2, ∂). Середньомісячне значення АОТ складало 0.04— 0.07 в цих регіонах (рис. 3, ∂), а вітри з південного заходу (23 %) та південного сходу (37 %) переносили атмосферні маси з продуктами горіння до Києва (рис. 4, ∂). На решті території України значення АОТ коливалося в межах 0.02—0.04.



Рис. 6. Середньомісячний розподіл аерозолів за розміром для березня — жовтня протягом 2008—2012 рр. над Києвом із мережі сонячних фотометрів AERONET

Середньомісячні значення АОТ і показник Ангстрема у березні —листопаді 2011 р. за даними супутникового поляриметра POLDER/PARASOL для декількох міст України наведені у таблиці. Порівняно із 2011 р. у 2012 р. збільшилася площа лісових пожеж (рис. 1) при майже незмінній їхній кількості, що пояснюється відсутністю опадів та сильними вітрами [2]. Наприклад, у липні 2012 р. по всій території України виникали лісові та степові пожежі (рис. 2, e). Відповідно значення АОТ характеризуються величинами 0.03—0.05 у центральній та південній Україні (рис. 3, e). Рух повітряних мас до Києва на висоті 500 м над поверхнею відбувався з усіх напрямків (рис. 4, e) з невеликою перевагою з півночі та сходу.

Для оцінок можливої природи та походження аерозольних частинок використано аналіз об'ємного розподілу за розмірами аерозолю у стовпі атмосфери. За даними станції AERONET у Києві видно (рис. 6), що радіус частинок, який відповідає максимумові розподілу (так званий «модальний» радіус) дрібнодисперсної фракції аерозолю у серпні 2008 року дорівнював 0.15, а в серпні 2010 р. — 0.2 мкм. Це можна пояснити тим, що у серпні 2010 р. джерела походження продуктів горіння знаходилися на більшій відстані від Києва, ніж у серпні 2008 р., коли пожежі відбувалися в центральних та південних областях України, оскільки розмір частинок таких аерозолів звичайно збільшується з часом [5]. Модальний радіус крупнодисперсної фракції для обох подій складає 4 мкм з максимумом в розподілі 0.03—0.04 мкм³/мкм², що свідчить про наявність продуктів горіння в обох фракціях і узгоджується з класифікаціями у роботах [24, 54].

Кількість крупнодисперсного аерозолю у порівнянні з дрібнодисперсним була більшою в стовпі атмосфери над Києвом у червні 2009 та 2010 років, що свідчить про можливу наявність частинок у стовпі атмосфери внаслідок ерозії ґрунтів або транспортування пустельного пилу з Сахари [36]. Об'ємний розподіл по розмірах у травні—липні 2012 р. характеризується більшим рівнем дрібнодисперсних частинок, ніж у цей же період інших років (рис. 6). Крім того, модальний радіус крупнодисперсного аерозолю у липні 2012 р. дорівнював близько 2.5 мкм у той час коли його значення протягом інших років складало 4-5 мкм. Це свідчить про те, що джерела походження продуктів горіння у цей період перебували на ближчій відстані від місця спостереження [5].

Модальний радіус дрібнодисперсної фракції протягом розглянутих місяців 2008—2012 рр. над Києвом лежить у межах від 0.1 до 0.2 мкм, а радіус частинок — у межах від 0.05 до 0.5 мкм, тоді як радіус крупнодисперсного аерозолю — від 1 до 15 мкм (рис. 6). Модальний радіус та різноманітність частинок за розміром для крупнодисперсного аерозолю змінюються у доволі широких межах (рис. 6). Характерною рисою є те, що кількість крупнодисперсних частинок збіль-

Місяць	Київ		Харків		Донецьк		Луганськ		Дніпро- петровськ		Севастополь		Львів		Рівне	
	AOT	α	AOT	α	AOT	α	AOT	α	AOT	α	AOT	α	AOT	α	AOT	α
березень	0.11	2.17	0.04	2.05	0.05	2.23	_	_	0.10	2.30	_	_	0.02	2.42	0.05	2.10
квітень	0.05	2.34	0.05	2.55	0.04	2.58	0.01	2.65	0.12	2.38	0.03	2.67	0.04	2.51	0.05	2.50
травень	0.05	2.24	0.03	2.36	0.01	2.30	0.01	2.30	0.01	2.30	0.01	2.30	0.04	2.15	0.03	2.32
червень	0.06	2.30	_	_	0.10	2.30	0.02	2.30	0.10	2.17	0.01	2.97	0.01	2.30	0.01	2.30
липень	0.10	2.32	0.05	2.21	0.03	2.60	0.05	2.05	0.07	2.23	0.04	2.51	0.05	2.23	0.05	2.30
серпень	0.06	2.34	0.02	2.57	0.01	2.54	0.01	2.30	0.02	2.34	0.02	2.56	0.04	2.33	0.02	2.30
вересень	0.04	2.28	0.06	2.20	0.02	2.46	0.03	2.80	0.05	2.37	0.03	2.42	0.03	2.30	0.02	2.55
жовтень	0.05	2.14	0.06	2.11	0.07	2.17	0.07	2.13	0.07	2.20	0.04	2.42	0.04	2.13	0.03	2.21
листопад	0.04	2.04	—	—	_	—	_	—	—	—	0.02	2.30	0.03	1.81	0.02	2.12

Середньомісячна оптична товщина аерозолю (АОТ) для λ = 865 нм і показник Ангстрема (α) у березні — листопаді 2011 року за даними супутникового поляриметра POLDER/PARASOL

шується в атмосфері починаючи з квітня по серпень, а потім зменшується до жовтня. Крім того, спостерігається подвійний максимум у розподілі крупнодисперсної фракції по розмірах з квітня по червень, що пояснюється сезонною природою походження частинок [24].

ВИСНОВКИ

У роботі за даними супутникових приладів POL-DER/PARASOL та MODIS визначено характеристики розподілу аерозолю в атмосфері над Україною та географічний розподіл пожеж протягом 2002—2012 pp. Дані приладу POLDER/ PARASOL дозволили отримати інформацію про дрібнодисперсні аерозолі типу продуктів горіння і антропогенного забруднення. Середньомісячне значення АОТ для спектрального каналу 865 нм за даними поляриметра POLDER для України становило 0.02-0.07 протягом досліджуваного періоду. Під час пожеж це значення збільшувалось вдвічі, а в окремих випадках — на порядок. Внаслідок надзвичайно спекотної та сухої погоди з квітня по вересень 2002—2012 рр. у Східній Європі виникали численні неконтрольовані лісові, степові та торф'яні пожежі. У 2004 р. та 2011 р. спалення великих площ у лісах не відбувалось чи було незначним, тому спостерігалося невисоке середньомісячне значення АОТ (0.02— 0.07) по всій території України.

За допомогою моделі HYSPLIT побудовані кластери зворотних траєкторій руху повітряних мас, що дозволили визначити природу та місцезнаходження аерозолів. Так, наприклад, продукти пожеж у квітні 2003 р., 2005 р. та у квітнітравні 2006 р. згідно з результатами кластерного аналізу частково рухалися з півдня на північ і могли досягати Арктики, де осідали на сніговому покриві, змінюючи його відбивні властивості. Тим самим у роботі були підтверджені результати попередніх робіт [44, 53, 64].

Найбільшими за викидами в атмосферу були пожежі в лісах і на торфовищах в центральноєвропейській частині Росії у серпні 2010 р. Середньомісячне значення АОТ над східною та центральною частиною України становило 0.3—0.5, що у десять разів більше у порівнянні з звичайними значеннями АОТ для даного місяця. Максимальні значення АОТ 0.4—0.7 протягом усього періоду спостережень були зареєстровані у період 14—16 серпня над Києвом та Луганськом.

Для аналізу об'ємного розподілу частинок по розмірах над Києвом протягом 2008—2012 рр. використано дані сонячного фотометра станції «Київ» мережі AERONET. Виявилось, що у серпні 2010 р. джерела надходження продуктів горіння перебували на більшій відстані від Києва, ніж у серпні 2008 р., коли пожежі відбувалися в центральних та південних областях України. Середні значення модального радіуса дрібнодисперсної фракції аерозолю в атмосфері над Києвом звичайно складають 0.1—0.2 мкм. Під час пожеж модальний радіус стає рівним 0.2—0.25 мкм, що може свідчити про одночасну наявність в атмосфері індустріальних аерозолів та продуктів горіння біомаси згідно з оцінками [24]. За наведеними даними можна також зробити висновок, що крупнодисперсні аерозолі у період з квітня по червень мають різне походження. Їхня кількість в атмосфері над Києвом збільшується з квітня по серпень, а потім зменшується до жовтня.

Роботу виконано в рамках проекту UKG2-2969-KV-09 Фонду CRDF США та за підтримки проекту PICS 2013-15. Автор вдячний співробітникам ICARE Data and Cervices Center за доступ до даних супутника PODLER/PARASOL, В. Holben (NASA-GSFC) за координацію мережі AERONET, а також В. Данилевському, Г. Міліневському та М. Сосонкіну за доступ до даних сонячного фотометра у Києві. Автор висловлює подяку NOAA Air Resources Laboratory (ARL) за доступ до даних GDAS1 для моделі HYSPLIT.

- 1. *Кабашников В. П., Акулинин А. А., Данилевский В. А. и др.* Исследование путей переноса атмосферных аэрозолей в Восточноевропейском регионе по данным сети AERONET методом кластерного анализа // Наук. праці УкрНДГМІ. — 2012. — Вип. **262**. — С. 20—30.
- 2. *Національна* доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні у 2012 році. Державна служба україни з надзвичайних ситуацій. Офіційний веб-сайт. — [Електронний ресурс] — Режим доступу: http://www. mns.gov.ua/content/nasdopovid2012.html.
- 3. Яцкив Я. С., Мищенко М. И., Розенбуш В.К. и др. Проект «АЭРОЗОЛЬ-UА»: дистанционное зондирование аэрозолей в земной атмосфере со спутника // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 4. — С. 3—15.

- Abdalmogith S. S., Harrison R. M. The use of trajectory cluster analysis to examine the long-range transport of secondary inorganic aerosol in the UK // Atmos. Environ. – 2005. – 39 (35). – P. 6686–6695.
- Amiridis V., Balis D. S., Giannakaki E., et al. Optical characteristics of biomass burning aerosols over Southeastern Europe determined from UV-Raman lidar measurements // Atmos. Chem. Phys. – 2009. – 9. – P. 2431–2440.
- Amiridis V., Giannakaki E., Balis D. S., et al. Smoke injection heights from agricultural burning in Eastern Europe as seen by CALIPSO // Atmos. Chem. Phys. 2010. 10. P. 11567–11576.
- Anderson T. L., Charlson R. J., Bellouin N., et al. An "A-Train" Strategy for Quantifying Direct Climate Forcing by Aerosols // Bull. Amer. Meteorol. Soc. – 2005. – 86. – P. 1795–1809.
- Barnaba F., Angelini F., Curci G., Gobbi G. P. An important fingerprint of wildfires on the European aerosol load // Atmos. Chem. Phys. – 2011. – 11. – P. 10487–10501.
- 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. P. 6587–6602.
- Bovchaliuk V., Bovchaliuk A., Milinevsky G., et al. Aerosol Microtops II sunphotometer observations over Ukraine // Adv. Astron. and Space Phys. – 2013. – 3. – P. 46–52.
- Bréon F.-M. Parasol Level-1 Product Data Format and User Manual // CEA/LSCE, CNES, France. – 2006. – 31 p.
- Bréon F.-M. Parasol Level-2 Product Data Format and User Manual // CEA/LSCE, CNES, France. – 2006. – 32 p.
- Bréon F.-M. Parasol Level-3 Product Data Format and User Manual // CEA/LSCE, CNES, France. – 2006. – 27 p.
- Bréon F.-M., Vermeulen A., Descloitres J. An evaluation of satellite aerosol products against sunphotometer measurements // Remote Sens. Environ. – 2011. – 115. – P. 3102– 3111.
- Chin M., Kahn R. A., Schwartz S. E. (Eds) Atmospheric aerosol properties and climate impacts. — Washington: U. S. Climate Change Science Program, 2009. — 128 p.
- Chubarova N., Nezval' Ye., Sviridenkov I., et al. Smoke aerosol and its radiative effects during extreme fire event over Central Russia in summer 2010 // Atmos. Meas. Tech. – 2012. – 5. – P. 557–568.
- Danylevsky V., Ivchenko V., Milinevsky G., et al. Aerosol layer properties over Kyiv from AERONET/PHOTONS sunphotometer measurements during 2008–2009 // Int. J. Remote Sens. – 2011. – 32. – P. 657–669.
- Danylevsky V., Ivchenko V., Milinevsky G., et al. Atmospheric aerosol properties measured with AERONET/ PHOTONS sun-photometer over Kyiv during 2008–2009 // Use of satellite and in-situ data to improve sustainability / Eds F. Kogan, A. Powell, O. Fedorov. – Dordrecht: Springer, 2011. – P. 285–294.
- 19. Deschamps P. Y., Bréon F. M., Leroy M., et al. The POL-DER mission: Instrument characteristics and scientific

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2013. Т. 19. № 5

objectives // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 1994. – **32**. – P. 598–615.

- Deuzé J. L., Bréon F. M., Devaux C., et al. Remote sensing of aerosols over land surfaces from POLDER-ADEOS-1 polarized measurements // J. Geophys. Res. – 2001. – 106. – P. 4913–4926.
- Dorling S. R., Davies T. D., Pierce C. E. Cluster analysis: a technique for estimating the synoptic meteorological controls on air and precipitation chemistry — method and applications // Atmos. Environ. — 1992. — 26. — P. 2575— 2581.
- Draxler R. R., Hess G. D. An overview of the HYSPLIT_4 modeling system of trajectories, dispersion, and deposition // Aust. Meteor. Mag. – 1998. – 47. – P. 295–308.
- Draxler R. R., Rolph G. D. HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY Website (http://ready.arl.noaa. gov/HYSPLIT.php) // NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD, 2013.
- 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. P. 590–608.
- Dubovik O., King M. D. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements // J. Geophys. Res. – 2000. – 105. – P. 20673–20696.
- Dubovik O., Smirnov A., Holben B. N., et al. Accuracy assessment of aerosol optical properties retrieval from AER-ONET sun and sky radiance measurements // J. Geophys. Res. 2000. 105. P. 9791–9806.
- Eck T. F., Holben B. N., Reid J. S., et al. The wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban and desert dust aerosols // J. Geophys. Res. 1999. 104. P. 31333–31350.
- Fan X. H., Goloub P., Deuzé J. L., et al. Evaluation of PAR-ASOL aerosol retrieval over North East Asia // Remote Sens. Environ. – 2008. – 112. – P. 697–707.
- Forster P., Ramasvamy V., Artaxo P. (Eds). IPCC Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change // Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007. – P. 129–234.
- Giglio L., Csiszar I., Justice C. O. Global Distribution and Seasonality of Active Fires as Oserved with the Terra and Aqua MODIS Sensors // J. Geophys. Res. – 2006. – 111. – G02016, doi:10.1029/2005JG000142.
- Giglio L., Descloitres J., Justice C. O., Kaufman Y. An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS // Remote Sens. Environ. – 2003. – 87. – P. 273–282.
- Giles D. M., Holben B. N., Eck T. F., et al. An analysis of AERONET aerosol absorption properties and classifications representative of aerosol source regions // J. Geophys. Res. – 2012. – 117. – P. 17203.

- Goloub P., Tanré D., Deuzé J. L., et al. Validation of the first algorithm applied for deriving the aerosol properties over the ocean using the POLDER/ADEOS measurements // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. - 1999. -37. - P. 1586-1596.
- Herman M., Deuzé J. L., Marchand A., et al. Aerosol Remote Sensing from POLDER/ADEOS over the Ocean. Improved Retrieval using Non-Spherical Particle Model // J. Geophys. Res. – 2005. – 110. – D10S02, doi:10.1029/2004JD004798.
- 35. 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. – P. 1–16.
- Israelevich P., Ganor E., Alpert P., et al. Predominant transport paths of Saharan dust over the Mediterranean Sea to Europe // J. Geophys. Res. – 2012. – 117. – D02205, doi:10.1029/2011JD016482.
- Kaufman Y. J., Justice C. O., Flynn L. P., et al. Potential Global Fire Monitoring from EOS-MODIS // J. Geophys. Res. – 1998. – 103. – P. 32215–32238.
- Kaufman Y. J., Tanré D., Boucher O. A satellite view of aerosols in the climate system // Nature. – 2002. – 419. – P. 215–223.
- 39. King M. D., Kaufman Y. J., Tanre D., Nakajima T. Remote sensing of tropospheric aerosols from space: past, present, and future // Bull. Amer. Meteorol. Soc. — 1999. — 80. — P. 2229—2259.
- Kondratyev K. Ya. Climatic effects of aerosols and clouds. — Chichester: Praxis, 1999. — 267 p.
- 41. Konovalov I. B., Beekmann M., Kuznetsova I. N., et al. Atmospheric impacts of the 2010 Russian wildfires: integrating modelling and measurements of an extreme air pollution episode in the Moscow region // Atmos. Chem. Phys. – 2011. – 11. – P. 10031–10056.
- 42. Korontzi S., McCarty J., Loboda T., et al. Global distribution of agricultural fires in croplands from 3 years of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data//Global Biogeochem. Cy. – 2006. – 20. – GB2021, doi:10.1029/2005GB002529.
- 43. Li Z., Zhao X., Kahn R., et al. Uncertainties in satellite remote sensing of aerosols and impact on monitoring its long-term trend: a review and perspective // Ann. geophys. – 2009. – 27. – P. 2755–2770.
- 44. Lund Myhre C., Toledano C., Myhre G., et al. Regional aerosol optical properties and radiative impact of the extreme smoke event in the European Arctic in spring 2006 // Atmos. Chem. Phys. – 2007. – 7. – P. 5899–5915.
- Luterbacher J., Dietrich D., Xoplaki E., et al. European Seasonal and Annual Temperature Variability, Trends, and Extremes since 1500 // Science. — 2004. — 303. — P. 1499—1503.
- 46. Milinevsky G. P., Danylevsky V. O., Grytsai A. V., et al. Recent developments of atmospheric research in Ukraine // Adv. Astron. and Space Phys. – 2012. – 2. – P. 114– 120.

- Mishchenko M., Cairns B., Hansen J., et al. Monitoring of aerosol forcing of climate from space: analysis of measurement requirements // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. – 2004. – 88. – P. 149–161.
- Mishchenko M. I., Cairns B., Kopp G., et al. Accurate monitoring of terrestrial aerosols and total solar irradiance: introducing the Glory Mission // Bull. Amer. Meteorol. Soc. – 2007. – 88. – P. 677–691.
- 49. Mishchenko M. I., Geogdzhayev I. V., Cairns B., et al. Past, present, and future of global aerosol climatologies derived from satellite observations: a perspective // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. — 2007. —106. — P. 325— 347.
- Mishchenko M. I., Geogdzhayev I. V., Rossow W. B., et al. Long-term satellite record reveals likely recent aerosol trend // Science. – 2007. – 315. – P. 1543.
- Morisette J. T., Giglio L., Csiszar I., et al. Validation of MODIS active fire detection products derived from two algorithms // Earth Interactions. - 2005. - 9. - P. 1-23.
- Nadal F., Bréon F.-M. Parameterization of surface polarized reflectance derived from POLDER spaceborne measurements // Geosci. and Remote Sens. — 1999. — 37. — P. 1709—1718.
- Pettus Ashley. Agricultural Fires and Arctic Climate Change: A Special CATF Report. — Boston, MA: Clean Air Task Force, 2009. — 33 p.
- 54. Remer L. A., Kaufman Y. J., Holben B. N., et al. Biomass burning aerosol size distribution and modeled optical properties // J. Geophys. Res.-Atmos. – 1998. – 103. – P. 31879–31891.
- Rolph G. D. Real-time Environmental Applications and Display sYstem (READY) Website (http://ready.arl.noaa. gov) // NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, 2013.
- 56. Rozwadowska A., Zieliński T., Petelski T., Sobolewski P. Cluster analysis of the impact of air back-trajectories on aerosol optical properties at Hornsund, Spitsbergen // Atmos. Chem. Phys. – 2010. – 10. – P. 877–893.
- 57. San-Miguel-Ayanz J., Barbosa P., Camia A. (Eds). European Commission. 2004. Forest fires in Europe 2003 fire campaign // Official Publication of the European Communities, SPI.04.124 EN, 2004. 51 p.
- Schmuck G., San-Miguel-Ayanz J., Barbosa P. (Eds.). European Commission. 2006. Forest fires in Europe 2005 // Official Publication of the European Communities, EUR 22 312 EN, 2006. — 55 p.
- 59. Schroeder W., Prins E., Giglio L., et al. Validation of GOES and MODIS active fire detection products using ASTER and ETM+ data // Remote Sens. Environ. – 2008. – 112. – P. 2711–2726.
- 60. Sciare J., Oikonomou K., Favez O., et al. Long-term measurements of carbonaceous aerosols in the Eastern Mediterranean: evidence of long-range transport of biomass burning // Atmos. Chem. Phys. – 2008. – 8. – P. 5551– 5563.

- Seinfeld J. H., Pandis S. N. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change. — New York: Wiley, 2006. — 1203 p.
- 62. Shindell D. T., Chin M., Dentener F., et al. A multi-model assessment of pollution transport to the Arctic // Atmos. Chem. Phys. – 2008. – 8. – P. 5353–5372.
- 63. Stohl A. Characteristics of atmospheric transport into the Arctic Troposphere // J. Geophys. Res. – 2006. – 111. – D113306, doi:10.1029/2005JD006888.
- 64. Stohl A., Berg T., Burkhart J. F., et al. Arctic smoke record high air pollution levels in the European Arctic due to agricultural fires in Eastern Europe in spring 2006 // Atmos. Chem. Phys. – 2007. – 7. – P. 511–534.
- *Tanré D., Bréon F. M., Deuzé J. L., et al.* Global observation of anthropogenic aerosols from sattelite // Geophys. Res. Lett. – 2001. – 28. – P. 4555–4558.
- 66. Tanré D., Bréon F. M., Deuzé J. L., et al. Remote sensing of aerosols by using polarized, directional and spectral measurements within the A-Train: the PARASOL mission // Atmos. Meas. Tech. – 2011. – 4. – P. 1383–1395.
- Witte J. C., Douglass A. R., da Silva A., et al. NASA A-Train and Terra observations of the 2010 Russian wildfires // Atmos. Chem. Phys. – 2011. – 11. – P. 9287–9301.

Стаття надійшла до редакції 27.06.13

А. П. Бовчалюк

ВЛИЯНИЕ ПОЖАРОВ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АЭРОЗОЛЯ НАД УКРАИНОЙ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ И НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Анализируются источники поступления и пути переноса аэрозолей лесных, степных, торфяных и сельскохозяйственных пожаров над Украиной в период 2002-2012 гг. Для характеристики распределения аэрозоля в атмосфере и визуализации мест горения на поверхности Земли использованы данные спутниковых приборов POLDER/PARASOL и MODIS соответственно, а с помощью модели HYSPLIT построены кластеры обратных траекторий движения воздушных масс. Для анализа объемного распределения частиц по размеру над Киевом в течение 2008-2012 гг. использованы данные всемирной сети солнечных фотометров AERONET. Наивысшие значения аэрозольной оптической толщи (АОТ) 0.4-0.7 для спектрального канала 865 нм, вызваны пожарами на торфяниках в центральноевропейской части России, были зарегистрированы в период с 14 по 16 августа 2010 г. над восточной и центральной частью Украины. Источники поступления продуктов горения в этот период находились на большем расстоянии от Киева по сравнению с августом 2008 г., когда пожары происходили в центральных и южных областях Украины. Среднемесячное значение АОТ на уровне 0.05-0.08 наблюдалось над северной и центральной Украиной в результате степных пожаров в Беларуси с апреля по май 2006 года. Определено, что трансграничный перенос атмосферы играет важную роль в распределении аэрозоля, и влияет на качество воздуха над всеми странами Восточной Европы. Во время пожаров радиус аэрозольных частиц мелкодисперсной фракции, который соответствует максимуму распределения по размерам, над Киевом равен 0.2—0.25 мкм, что может свидетельствовать об одновременном присутствии индустриального аэрозоля и продуктов горения биомассы. Кроме того, наблюдается двойной максимум распределения крупнодисперсной фракции с апреля по июнь, что можно объяснить сезонной природой происхождения частиц. Объемное распределение аэрозолей по размерам в мае — июле 2012 г. характеризуется наибольшим наличием мелкодисперсных частиц по сравнению с этим же периодом других лет.

A. P. Bovchaliuk

FIRE IMPACT ON AEROSOL DISTRIBUTION OVER UKRAINE FROM SATELLITE AND GROUND-BASED MEASUREMENTS

We analyze the sources of aerosol transport from forest, steppe, peat and agricultural fires over Ukraine from 2002 to 2012. Some data from the satellite instruments POLDER/ PARASOL and MODIS were used to characterize the distribution of aerosol particles in the atmosphere and to visualize fire locations on Earth's surface, respectively. The cluster analysis was used to classify air mass back trajectories using the HYSPLIT model. Moreover, the data obtained by ground-based network AERONET were used for analysis of volume size distributions over Kyiv site during 2008–2012. The maximum values of aerosol optical thickness (AOT) at 870 nm wavelength ranging from 0.4 to 0.7 were observed from 14 to 16 August 2010 over Eastern and Central Ukraine, which were caused by strong forest and peat wildfires in the central area of European part of Russia. The sources of aerosol combustion were located at greater distance from Kyiv during this period in comparison to August 2008, when fires occurred in the Central and Southern Ukraine. The monthly average AOT ranging from 0.05 to 0.08 was observed over Northern and Central Ukraine as a result of steppe wildfires in Belarus from April to May 2006. It was determined that transboundary transport of atmosphere plays an important role in the aerosol distribution and affects on air quality over all the Eastern European countries. The radii of fine fraction aerosols corresponding to maxima of the size distribution are equal to 0.2-0.25 µ over Kyiv site during wildfires which may be evidence for the presence of biomass burning and industrial aerosols simultaneously. Furthermore, some features are observed in the size distribution of coarse fraction in the form of double peak from April to June which can be explained by the seasonal nature of particle origin. The volume size distribution is characterized by the most significant fraction of fine particles in May - July 2012 as compared to the same period in other years.