

УДК 551.51:551.510:551.510.4:551.510.42,  
PACS number(s): 92.60.Mt Particles and aerosols 89.40.  
Dd Air transporation

## ДИНАМІКА АЕРОЗОЛІВ У АТМОСФЕРІ НАД СХІДНОЮ ЄВРОПОЮ ЗА ДАНИМИ AERONET ПІД ВПЛИВОМ ПОГОДНИХ УМОВ ПРОТЯГОМ ЛІТА 2010

Є.І. Галицька<sup>1,2</sup>, асп.,  
В.О. Данилевський<sup>1</sup>, к.ф.-м.н.,  
С.І. Сніжко<sup>1</sup>, д. геогр. н.,

<sup>1</sup> Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Україна, 01601, місто Київ, вул. Володимирська, 64/13, tempo2007@meta.ua

<sup>2</sup> Бременський університет, Інститут фізики навколишнього середовища

Німеччина, 330440, місто Бремен, вул. Отто-Ханн-Аллее 1, egalyska@gmail.com

У роботі представлено результати аналізу даних про спектральні оптичні характеристики аерозолів у атмосфері над Східною Європою за вимірюваннями у міжнародній мережі сонячних фотометрів AERONET, а також динаміки пожеж рослинності на цій території улітку 2010 року за даними супутникового приладу MODIS. Було виявлено та проаналізовано вплив лісових пожеж, горіння торфу та трав'яного покриву на вміст, динаміку і властивості атмосферного аерозолію над Україною та прилеглими регіонами з урахуванням розвитку синоптичної ситуації та переміщень атмосферних мас. Для дослідження шляхів переміщень аерозолів у атмосфері були використані зворотні траєкторії руху повітряних мас до місць спостережень, обчислені за допомогою моделі HYSPLIT для висот 0.5, 1.5, 3, 4 і 5 км. Показано, що підвищений вміст аерозолів над спостережними станціями AERONET, розташованими на території України, Росії, Молдови, Румунії, Польщі, Білорусі й Естонії, що збігся з у часі з періодом сильних лісових пожеж на Європейській території Росії (ЄТР), у різні періоди з середини липня до середини серпня 2010 р. над різними територіями був зумовлений як пожежами на ЄТР, так і на південному сході України, у Молдові та Польщі.

**Ключові слова:** аерозолі, AERONET, Східна Європа, синоптичний аналіз, зворотні траєкторії, HYSPLIT.

### 1. ВСТУП

Аерозолі в найпростішій своїй формі є сукупністю твердих та рідких часточок природного та антропогенного походження, завислих у повітрі. Аерозоль – це двофазна система, що складається з часточки та газу, в якому ця часточка зависла. До аерозолів відносять пил, дим, туман, хмари, смог та ін. Дослідження властивостей та динаміки аерозольних частинок має важливе практичне значення, наприклад для вивчення процесів хмароутворення в атмосфері, а також для досліджень особливостей утворення, перенесення та подальшої еволюції цих забруднювачів повітря [10, 24]. Необхідно відзначити і важливість впливу аерозолів на радіаційний баланс Землі, що полягає у безпосередньому поглинанні та розсіюванні сонячного випромінювання, а також опосередкованого впливу на клімат через зміну мікрофізичних властивостей хмар.

Крім того, аерозольні частинки, що характеризуються значною динамікою в часі та просторі, можуть бути перенесені за сотні, а в окремих

випадках і тисячі кілометрів від джерел надходження в атмосферу і впливати на стан її забруднення у віддалених регіонах, як, наприклад, у випадках надходження пилового аерозолію з Сахари на Чорне море [23], або з південних регіонів України на Центральну Європу [1]. Зокрема, значна увага міжнародної наукової спільноти протягом останніх років була привернута до досліджень аерозольного забруднення атмосфери над обширними територіями унаслідок стихійних великомасштабних лісових пожеж у центральних і західних регіонах Росії влітку 2010 р. (див. наприклад [4, 15, 20]. Так, у [4] здійснений аналіз властивостей аерозолів і їх радіаційний вплив у період сильних пожеж у Центральній Росії у 2010 році за даними мережі сонячних фотометрів AERONET та радіаційних вимірювань. Було відзначено, що надзвичайно високі значення аерозольної оптичної товщі в Москві і передмісті спостерігалися 6-8 серпня з досягненням абсолютного максимуму 7 серпня. При цьому спостерігались значні зміни в хімічному складі атмосфери, оптичних та радіаційних

характеристиках аерозолію і, як наслідок, в інтенсивності сонячного випромінювання на земній поверхні. Крім того, висока концентрація аерозолів мала негативний вплив на здоров'я населення: смертність у Центральних регіонах європейської Росії за цей період збільшилася в 1,5 – 1,6 рази.

У [20] зазначено, що у період з середини липня по середину серпня 2010 року склались ідеальні умови для високої активності лісових пожеж в країнах Східної Європи. Спостереження пожежної активності з супутниковими приладами показали, що найбільша кількість пожеж (з 22 липня по 18 серпня) була зафіксована протягом періоду з постійною антициклонічною циркуляцією, унаслідок застою повітря накопичені забруднювальні домішки рециркулювали. Згідно з супутниковими спостереженнями, центр ЄТР (включаючи Москву) знаходився під впливом одного з найвищих рівнів забруднення лісовими пожежами. Зокрема Москва зазнала впливу хмари забруднених домішок, що надходили з осередків інтенсивних пожеж, розташованих на південь і схід від міста.

Детальне дослідження аерозольного забруднення атмосфери протягом літа 2010 року також представлено у роботі [17], де окрім наземних (AERONET) та супутникових вимірювань (POLDER, CALIOP), були використані моделі перенесення аерозольних частинок (CHIMERE, WRF) для визначення радіаційного впливу аерозолів. У [21] були проаналізовані джерела надходження та транспортування аерозолів з лісових, степових, торф'яних і сільськогосподарських пожеж над Україною протягом 2002—2012 років засобами наземних та супутникових вимірювань. Зокрема, автор наголошує на аномальних погодних умовах, що сприяли накопиченню аерозолію в атмосфері в серпні 2010 року.

Мета нашого дослідження – відтворити детальніше, ніж у зазначених вище публікаціях, шляхи впливу лісових пожеж, горіння торфу та трав'яного покриву протягом літа 2010 р. на вміст, динаміку і властивості атмосферного аерозолію над Україною та прилеглими регіонами за даними наземних вимірювань, аналізу синоптичної ситуації і моделювання переміщення атмосферних мас. Хоча окремі аспекти впливу пожеж на забруднення атмосфери над Східною Європою, і зокрема Україною, улітку 2010 року вже розглядалися у декількох публікаціях, зок-

рема у [2, 16, 17, 20, 21], важливі, на нашу думку, деталі атмосферних процесів, що вплинули на просторово-часовий розподіл аерозолів, залишилися не з'ясованими. Так, залишилися без уваги рух повітряних мас на висотах вище 1 км та тривалість їхнього перебування над різними територіями перед прибуттям у місце спостережень. У зазначених вище дослідженнях розглядалися повітряні потоки у межах висот до 1 км, тоді як під час інтенсивних пожеж продукти горіння піднімаються на значно більші висоти [17], де захоплюються повітряними потоками. До того ж, дрібні й легкі частинки здатні перебувати на висотах до декількох кілометрів і переноситися на значні відстані. Тому нами використовуються зворотні траєкторії повітряних мас, що надходять до місць спостережень на висотах до 5 км, і досліджується їхній рух протягом 7 діб до моменту спостережень над конкретним містом. Це дало змогу детальніше оцінити походження аерозолів і, зокрема, виявити значний внесок пожеж на півдні, сході України та заході Росії як джерела підвищеного вмісту аерозолів у Східній Європі.

## 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВИКОРИСТАНІ ДАНІ

### 2.1 Оптичні характеристики аерозолів за даними AERONET

Одним з найефективніших засобів наземного дистанційного моніторингу аерозолів у регіональному і глобальному масштабах є міжнародна мережа автоматичних сонячних фотометрів AERONET (AErosol RObotic NETwork, <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>), заснована Національним космічним агентством США (NASA) та Національним центром наукових досліджень Франції (CNRS – Centre National de la Recherche Scientifique), представленим Лабораторією оптики атмосфери Університету наук і технологій м. Ліля (Університет Ліль 1), в 90-х роках ХХ століття. Усього мережа нараховує декілька сотень діючих станцій у всьому світі. Основним принципом AERONET є стандартизація обладнання і його метрологічного забезпечення, методів вимірювань і обробки результатів, які зберігаються у централізованій базі даних. Засоби й методи вимірювань та обробки даних, а також використовувана термінологія викладені у [11] та у документації, розміщеній на інтернет - сторінці AERONET. За спостережними даними, одержан-

ними з цими сонячними фотометрами, за допомогою спеціальних алгоритмів [8, 9] визначаються оптичні характеристики аерозольного шару та оптичні й мікрофізичні характеристики аерозольних частинок, усереднені у стовпі атмосфери над місцем спостережень, зокрема розподіл за розмірами, альbedo однократного розсіювання, фазова функція, комплексний показник заломлення.

У цій роботі аналізується оптична товща аерозольного шару (згідно з прийнятою в AERONET термінологією вона позначається AOD – Aerosol Optical Depth) при довжині хвилі 500 нм та параметр Ангстрема, визначений у спектральному діапазоні 440 – 870 нм. Параметр Ангстрема ( $\alpha$ ) – це показник степеня емпіричної функції, що використовується для оцінки залежності спектральної аерозольної оптичної товщі від довжини хвилі випромінювання і вказує на середній розмір частинок в стовпі атмосфери над місцем спостереження [14]. При значенні  $\alpha \approx 0$  у атмосфері переважають великі аерозольні частинки ( $d > 1 \mu\text{m}$ ), такі як ґрунтовий пил; при  $\alpha \rightarrow 2,0$  можна зробити висновки про домінування аерозолів середніх розмірів ( $0,1 < d < 1 \mu\text{m}$ ), таких як сульфати та часточки диму.

Для дослідження літнього періоду 2010 року в роботі використовувались дані усіх вимірювань (allpoints в термінології AERONET) та середньодобові значення зазначених параметрів найвищої точності та гарантованої якості, отримані після урахування хмарності та змін характеристик фотометрів, для станцій України і сусідніх держав: Мінськ (Білорусь), Москва (Російська Федерація), Тиравере (Естонія), Бельск (Польща), Кишинів (Молдова), Севастополь та Київ (Україна), Клуз-Напока, Бухарест та Ефорі (Румунія). Залучення цих станцій AERONET обґрунтовується необхідністю встановлення масштабів поширення забруднюючих домішок протягом червня – серпня 2010 року.

## 2.2 Характеристика розподілу пожеж за супутниковими даними

Дослідження локалізації та інтенсивності пожеж здійснювалось за даними супутникового приладу MODIS. MODIS (MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer) – скануючий спектро-радіометр середньої роздільної здатності, встановлений на супутниках Terra (з лютого 2000 р., <http://terra.nasa.gov/about/>) та Aqua (з червня 2002 р. <http://atrain.gsfc.nasa.gov/>), що виконують вимірювання в рамках Системи спостереження

Землі (NASA's Earth Observing System – EOS). Дані цього приладу широко використовуються для досліджень земної атмосфери та поверхні як для кліматології, так і для вивчення біосфери. Виявлення пожеж здійснюється за допомогою алгоритму, який використовує інтенсивність випромінювання середнього інфрачервоного діапазону спектру (при довжинах хвиль 4 та 11  $\mu\text{m}$  [12]) від осередків пожеж. У більшості випадків MODIS фіксує пожежі рослинності, хоча іноді це можуть бути і виверження вулканів або спалахи з газових свердловин. Детальнішу інформацію про алгоритми розпізнавання пожеж та оцінювання їхньої інтенсивності, принципи архівування та поширення даних можна знайти у [5, 13, 18]. Дані про розподіл пожеж знаходяться у вільному доступі в мережі Інтернет, за підтримки NASA, і зберігаються за такими посиланням: <https://earthdata.nasa.gov/data/near-real-time-data/firms>.

## 2.3 Джерела даних про метеорологічну ситуацію у досліджуваному регіоні протягом літа 2010 р.

Для аналізу впливу погодних умов на розподіл аерозолів у атмосфері протягом червня-серпня 2010 року були використані синоптичні карти Українського гідрометеорологічного центру на основних ізобаричних висотах: аналіз приземний (вимірювання основних метеорологічних параметрів здійснені на висоті 2 м, АТ-850 (на висоті приблизно 1,5 км), АТ-700 (близько 3 км) та АТ-500 (5 км). Додатково були залучені архівні синоптичні карти міжнародних дослідницьких центрів з використанням таких інтернет-ресурсів:

- <http://www.wetterzentrale.de/topkarten> - де розміщені архівні карти 500 гПа / аналіз приземний GFS (Global Forecast System) – Глобальної системи прогнозів США.

- <http://www1.wetter3.de> – архів карт аналізу приземного Німецької служби погоди.

## 2.4 Дослідження переміщень атмосферних мас. Зворотні траєкторії HYSPLIT

Для підтвердження результатів синоптичного аналізу подій літа 2010 року, була застосована модель траєкторій руху повітряних мас HYSPLIT. HYSPLIT – Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model – це проінте-

грована за Лагранжем траєкторія пробної частинки. Для обчислень траєкторій використовуються метеорологічні дані, які є результатами метеорологічних спостережень і розрахунків за допомогою чисельних метеорологічних моделей [7]. Ця модель поєднує в собі найпоширеніші в математичному моделюванні атмосферних процесів моделі – Ейлера та Лагранжа і вважається гібридною. Розрахунки адвекції та дифузії здійснюються в межах методу Лагранжа, а концентрація речовин у повітряному потоці обчислюється у кожній фіксованій точці простору. Перевагою використання цієї моделі у порівнянні з синоптичними методами є висока деталізація, можливість аналізу флуктуацій повітряної частинки у просторі.

Згідно з результатами детального аналізу [19] типова похибка обчислень траєкторій становить  $\approx 20\%$  у горизонтальній площині для проміжків часу  $> 24$  год у вільній тропосфері, а після 120 год помилки становлять  $\approx 400$  км у горизонтальній і  $\approx 300$  м у вертикальній площинах. Детальна характеристика моделі і науково-методичні аспекти її використання викладені, зокрема, у [3, 6, 22]. Програмне забезпечення моделі знаходиться у вільному доступі (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>) і може бути завантажено разом з усіма необхідними для його роботи утилітами.

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ АНАЛІЗ

#### 3.1 Вміст і характеристики аерозолію влітку 2010 року

Як зазначено вище, для виявлення впливу лісових пожеж літа 2010 року був здійснений аналіз таких оптичних характеристик аерозолію, як AOD (у спектральному каналі 500 нм) та параметр Ангстрема 440-870 нм для станцій AERONET в Україні та в сусідніх державах. Результати виконаного раніше аналізу характеристик аерозольного забруднення атмосфери над Східною Європою частково наведені у [2, 16]. Це, зокрема, характеристики аерозольного шару і аерозольних частинок над Києвом за даними AERONET протягом 2008 – 2013 рр. Тут ми наводимо результати характеристик детальнішого

аналізу аерозолів лише протягом літа 2010 р.

Аналіз щоденно осереднених значень AOD у спектральному каналі 500 нм (рис. 1) вказує на значну динаміку аерозолів в часі з вираженими максимумами 15 – 17 серпня в Києві, Севастополі, Бухаресті та Мінську (див. табл. 1), що свідчить про накопичення аерозолів з одного й того джерела забруднення в межах одного синоптичного процесу. Зокрема, максимальні значення для досліджуваних станцій були зафіксовані в серпні (у Бельську та Молдові – в липні). Найвищі показники AOD були виміряні в Москві (понад 4.0) у першій половині серпня, що не було нанесено на рис. 1 через неспівмірність цього значення з іншими.

Аналіз щоденно осереднених значень параметра Ангстрема (рис. 2), що змінювався від 1 до 1.8, вказує, що середній діаметр ( $d$ ) частинок у стовпі атмосфери над досліджуваними містами знаходився в межах  $0,1 < d < 1$  мкм. Крупні частинки з діаметром більше 1 мкм спостерігались лише у червні переважно у Києві, Севастополі та Мінську, про що свідчать малі значення показника Ангстрема.

Для більш детальної оцінки динаміки аерозолів були залучені дані усіх вимірювань та проведений елементарний статистичний аналіз значень AOD-500 нм, результати якого представлені у табл. 1. Найбільша кількість спостережних даних була одержана у Севастополі (що пов'язано із найсприятливішими погодними умовами) – понад 3,5 тис. вимірювань, у Києві – близько 3 тис. та у Бухаресті – понад 2 тис. Найбільше середнє значення було зафіксовано у Москві, Києві та Бухаресті, що свідчить про найбільшу забрудненість повітря аерозолем у даний період у порівнянні з іншими досліджуваними містами. Значення стандартного відхилення даних від усереднених, що для Москви становило 0,46, а для Києва та Мінська 0,2, свідчать про значні варіації AOD протягом досліджуваного періоду. Такі високі значення вмісту аерозолію в атмосфері над Москвою у порівнянні з іншими станціями можуть бути пояснені близькістю розташування джерела забруднення та інтенсивністю надходження забруднюючих домішок від нього.

Таблиця 1 - Статистичний аналіз розподілу AOD-500 нм влітку 2010 року

Місто	Кількість значень	Середнє	Мінімум	Максимум	Дата максимуму	Стандартне відхилення
Бельськ	1938	0.18	0.05	0.74	16.07.2010	0.11
Бухарест	2381	0.30	0.06	0.97	17.08.2010	0.16
Клуж-Напока	1220	0.25	0.04	0.62	01.08.2010	0.13
Ефорі	1855	0.24	0.06	0.59	01.08.2010	0.10
Київ	2732	0.30	0.05	1.26	15.08.2010	0.20
Мінськ	1368	0.25	0.04	1.27	17.08.2010	0.20
Молдова	1343	0.22	0.05	0.62	13.07.2010	0.11
Москва	1573	0.36	0.05	4.62	07.08.2010	0.46
Севастополь	3564	0.23	0.04	0.93	16.08.2010	0.12
Тиравере	1296	0.20	0.03	1.23	07.08.2010	0.19

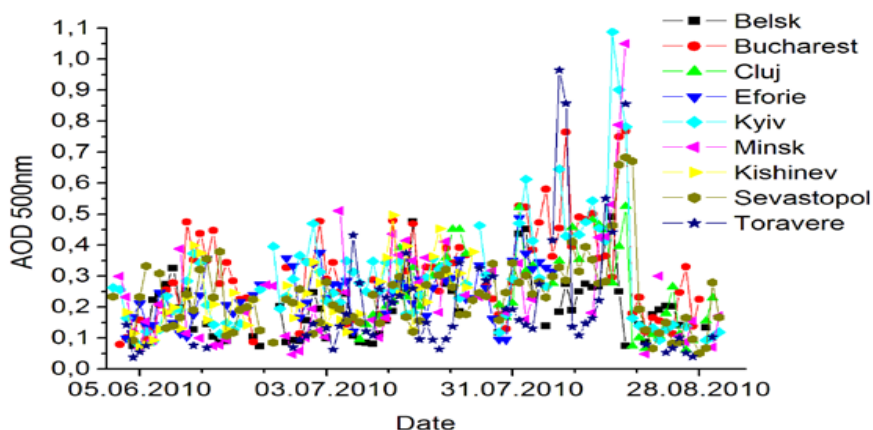


Рис. 1 – Зміна з часом щоденно усереднених AOD для довжини хвилі сонячного випромінювання 500 нм впродовж літа 2010 року

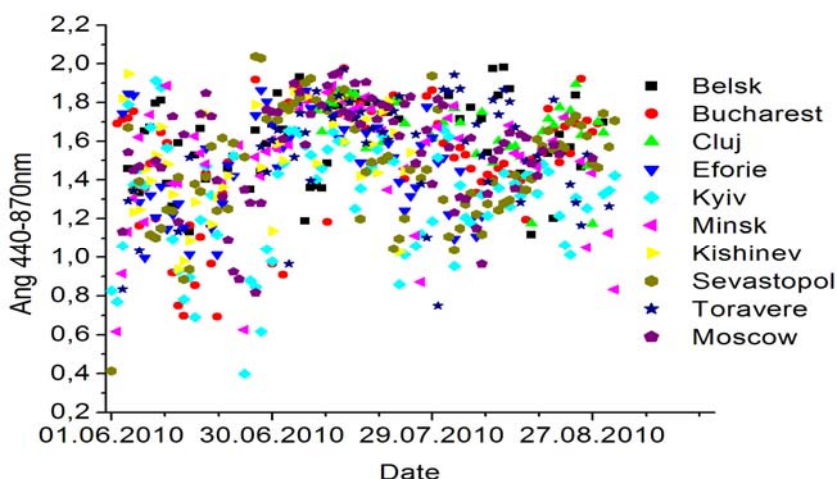


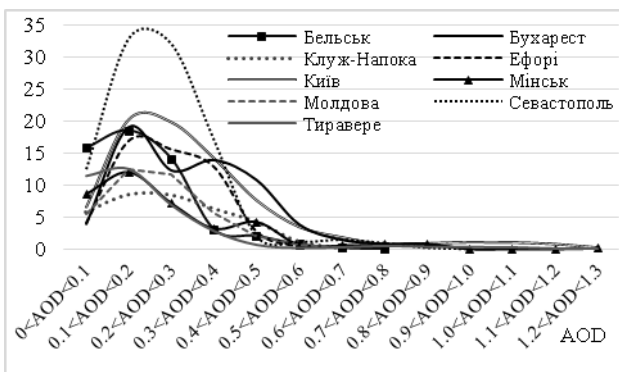
Рис. 2 – Зміна з часом щоденно усереднених значень параметра Ангстрема для діапазону 440 – 870 нм впродовж літа 2010 року.

Для встановлення частоти спостережуваних AOD у різних діапазонах були побудовані криві

її розподілу для кожного з досліджуваних міст, представлені на рис. 3, на осі абсцис якого нане-

сені діапазони AOD (від 0 до 0,1, від 0,1 до 0,2 і т.д), на осі ординат – відносна частка AOD, що належить до відповідних інтервалів значень. З рис.3 видно, що значення AOD в межах 0 – 0,3 спостерігалися найчастіше: для Севастополя у понад 30% усіх вимірювань, Києва, Бельська, Бухареста – у 15 – 20%. Загальною рисою, притаманною усім досліджуваним станціям, є переважання малих значень AOD (в межах 0 – 0,4). AOD понад 0,7 реєструвалися досить рідко (0-3% усіх одержаних значень).

Безперечно, максимуми AOD в кінці липня – на початку серпня, що спостерігалися на досліджуваних станціях, сприяли виявленню джерела їх надходження. Результати зазначених вище досліджень (див. Вступ) пов'язують явища підвищеного вмісту аерозолів у цьому регіоні з впливом лісових пожеж на Європейській території Росії (ЄТР). Саме тому у нашому дослідженні була використана інформація про локалізацію та інтенсивність пожеж на території Східної Європи влітку 2010 р. за даними супутникового приладу MODIS.



**Рис. 3** – Криві розподілу AOD 500 нм за інтервалами значень протягом літа 2010 року для різних станцій (у відсотках від усієї кількості даних для кожної станції).

Необхідно зазначити, що пожежі після середини липня відбувалися не лише на ЄТР, а і на території України, Молдови та Польщі. Причому їхня кількість та інтенсивність сягнули максимуму в кінці липня – на початку серпня. За даними Українського гідрометцентру над Україною у досліджуваний період був встановлений високий та надзвичайний клас пожежної небезпеки.

Для виявлення причин накопичення аерозолів у атмосфері над досліджуваною територією нами було проаналізовано синоптичну ситуацію для кожного окремого періоду літа 2010 року. Протягом червня та липня на території України спостерігалась нестійка погода, яку визначали в основному атмосферні фронти та циклонічна циркуляція повітряних мас. Упродовж 1-17 серпня в Україні встановився аномальний характер погоди, що відзначався стійким положенням висотного антициклону та гребеня над ЄТР та Уралом. Внаслідок цього на територію України поширювалося субтропічне повітря, яке зумовило спекотну погоду (див. також у [25]). Відповідно, в першу половину серпня спостерігались сприятливі умови для накопичення аерозолів у атмосфері над зазначеними територіями. 18 – 21 серпня атмосферні фронти зумовили суттєву зміну погоди у Східній Європі, що призвело до різкого спаду вмісту аерозолів над залученими до досліджень спостережними станціями у другій половині серпня.

З більшою деталізацією джерела надходження аерозолів можна встановити, побудувавши зворотні траєкторії для об'ємів повітря, що надійшли до місця спостережень на середину конкретного дня на різних висотах. З цією метою для кожної з досліджуваних станцій для днів з максимальним вмістом аерозолів були побудовані зворотні траєкторії руху повітряних мас, що надійшли протягом 168 годин, тобто 7 днів (рис.4), до відповідної станції на висотах 500, 1500 та 3000, 4000 та 5000 м на 12 годину за Грінвичем.

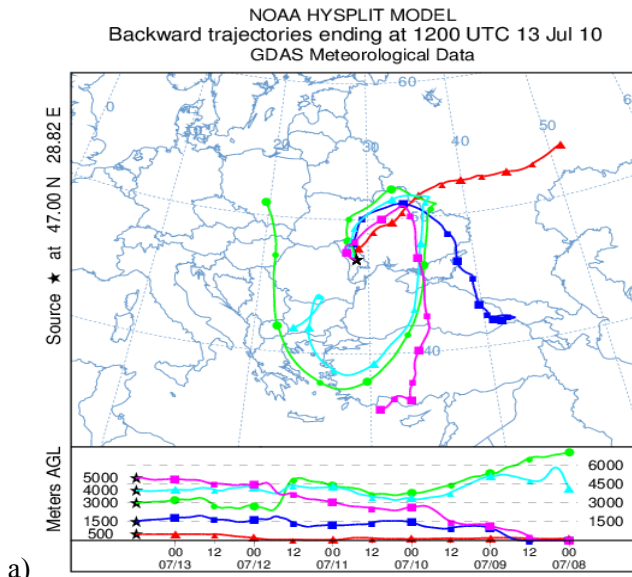
Спершу максимуми вмісту аерозолів були зафіксовані в Молдові та Бельську (13 та 16 липня відповідно). Обчислені для цих міст зворотні траєкторії показані на рис. 4а. Причому, якщо до Молдови аерозолі надходили і з Європи (на висоті 3 – 4 км), і з ЄТР (0,5 км) і з району Чорного моря (1,5 км), то у Бельську були переважно аерозолі з Атлантичного океану, які переносились через Європу (1,5 – 5 км) та Прибалтики (0,5 км).

У двох пунктах Румунії (Клуз-Напока та Ефорі) максимум AOD був зафіксований 1 серпня. Відповідно до рис. 4б, спільною рисою, притаманною обома містам, було надходження аерозолів у нижньому 1,5 км шарі з районів пожеж на південному сході України та з Молдови.

При цьому аерозольні частинки на висотах 3 – 4 км переносились з Атлантики через територію Європи.

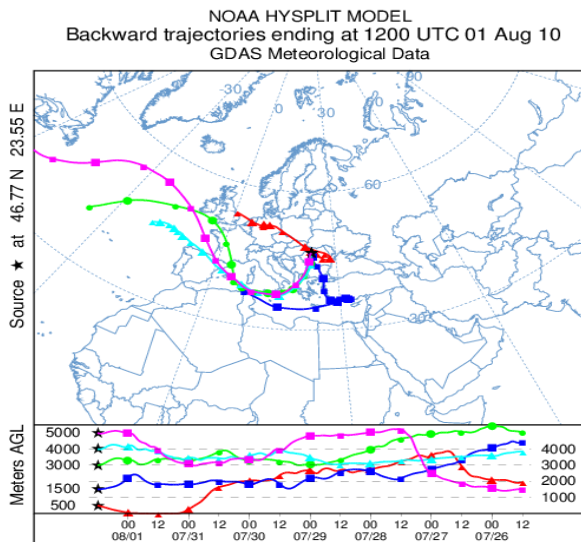
На рис. 4в зображені зворотні траєкторії для Москви та Тиравере, де максимуми AOD були зафіксовані 7 серпня. Відповідно до отриманих даних траєкторії відповідають антициклонічній циркуляції (у випадку Москви), а до Тиравере об'єми повітря надходили з Азії через регіони сильних пожеж на південному сході України.

У Києві, Севастополі, Мінську та Бухаресті максимуми спостерігались у середині серпня (15 – 17 серпня). На рис. 4г наведені траєкторії переміщення повітряних мас для Севастополя та Мінська, спільною рисою яких було перенесення аерозолів у нижньому 3-км шарі зі сходу та півдня, де спостерігались сильні пожежі.



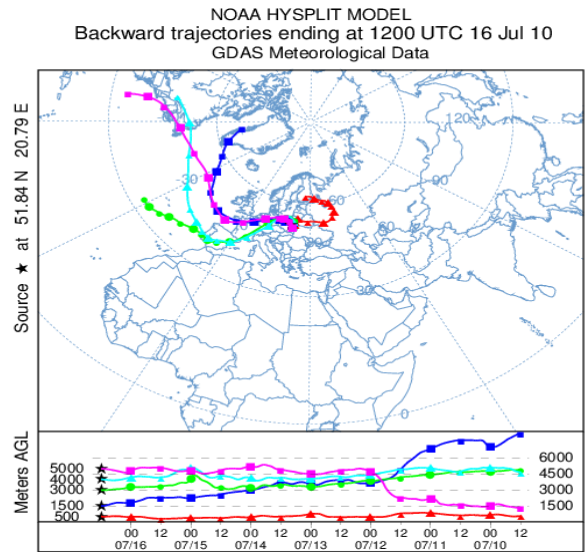
a)

Молдова

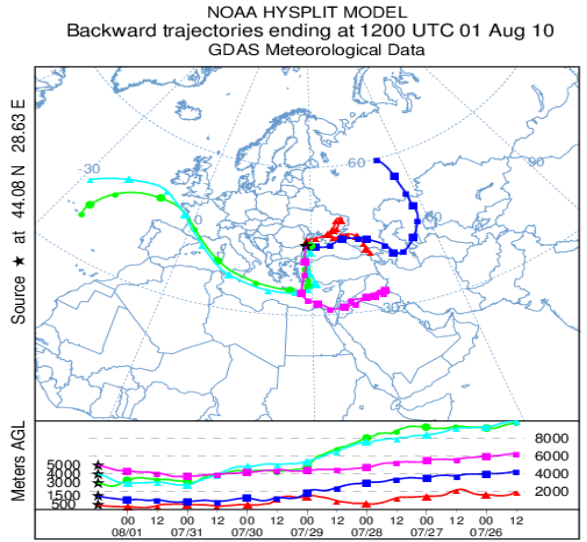


b)

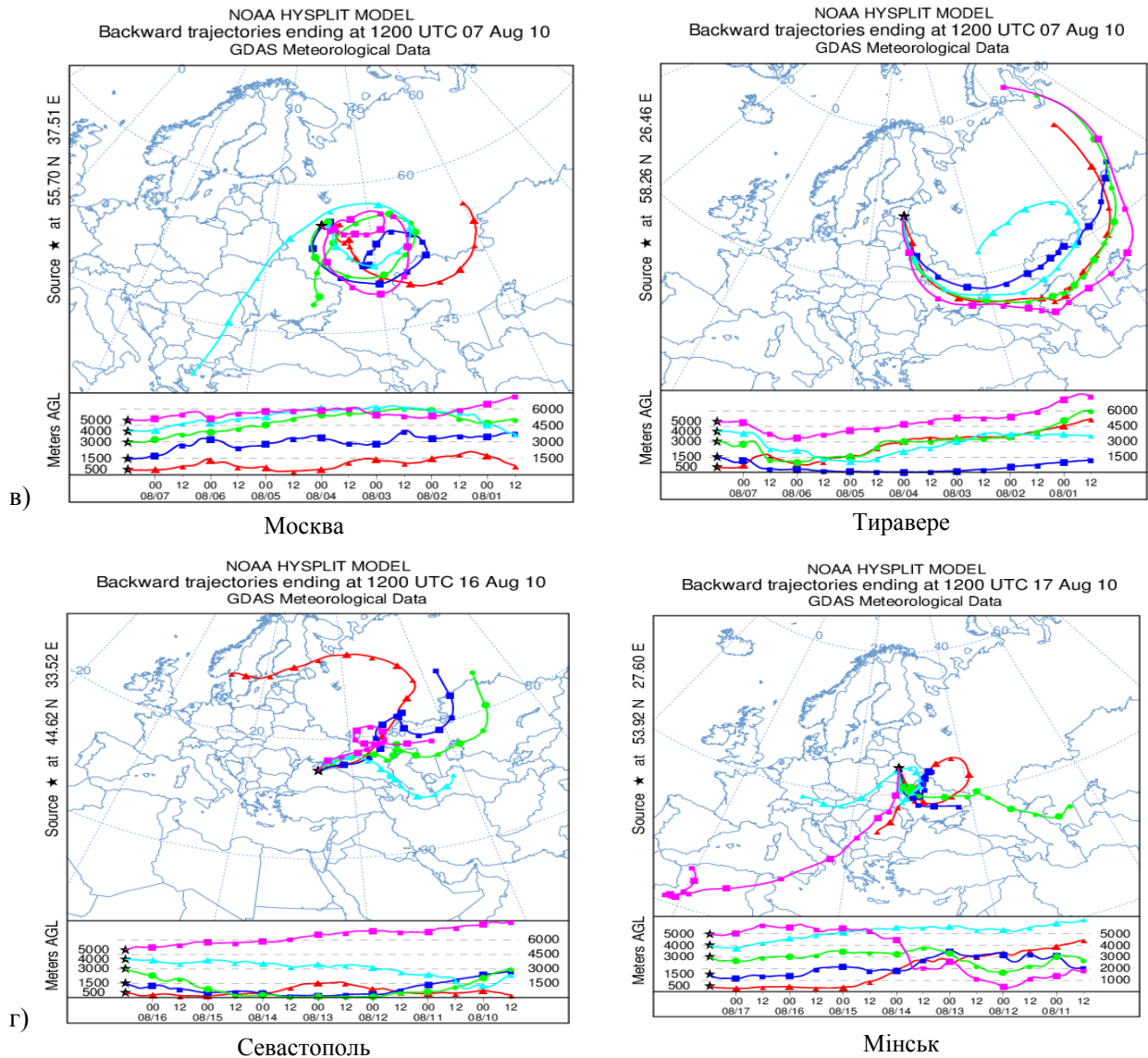
Клуж-Напока



Бельськ



Ефори



**Рис. 4** - Зворотні траєкторії повітряних мас протягом 168 годин, що надійшли на висотах 500, 1500 та 3000, 4000 та 5000 м на 12 годину за Грінвічем у дні максимумів AOD: а) Молдова, Бельськ; б) Клуж-Напока, Ефорі; в) Москва, Тиравере; г) Севастополь, Мінськ (позначки на траєкторіях нанесені з інтервалом у 12 годин).

#### 4. ВИСНОВКИ

У роботі досліджена динаміка аерозолів у атмосфері над територією Східної Європи протягом літа 2010 р., коли внаслідок специфічних метеорологічних умов склалася пожежонебезпечна ситуація та виникли стихійні лісові пожежі, що охопили значну частину зазначеної території. Шляхом аналізу супутникових даних та даних спостережень за вмістом у атмосфері і оптичними характеристиками аерозолів за допомогою сонячних фотометрів мережі AERONET, розташованих на території України, Росії, Молдови, Румунії, Польщі, Білорусії й Естонії, встановлено, що підвищений рівень аерозольної оптичної товщі над зазначеними станціями збігся у часі з

періодом сильних лісових пожеж на Європейській території Росії, а саме з середини липня до середини серпня 2010 р. Отже, пожежі на ЄТР, південному сході України, у Молдові та Польщі і були причиною збільшення концентрації забруднюючих домішок.

Для цього був виконаний статистичний аналіз спектральної оптичної товщі аерозолію для довжини хвилі сонячного випромінювання 500 нм над зазначеними станціями AERONET протягом літа 2010 р., встановлені рівні AOD, що найчастіше спостерігалися над кожною з них, виявлені проміжки часу, протягом яких вони спостерігалися. Зокрема найвищий рівень вмісту аерозолію над усіма зазначеними станціями спостерігався,



починаючи з середини липня по середину серпня. Найбільший максимум AOD був зафіксований у Москві (AOD(500 нм) = 4,62), що обумовлено близькістю розташування міста до джерела забруднення. Локалізація, інтенсивність пожеж та їхня часова динаміка були визначені за даними приладів MODIS, встановлених на супутниках NASA Aqua і Terra.

З синоптичного аналізу метеорологічних умов над зазначеними територіями протягом літа 2010 р. зроблено висновок про аномальність погодних умов другої половини літа, яка проявлялась в антициклонічному характері погоди з низькою хмарністю, відсутністю опадів, малими швидкостями вітру та високими температурами повітря над Східною Європою і сприяла накопиченню аерозолів в атмосфері. Зокрема, максимумами AOD у Києві, Севастополі, Мінську та Бухаресті в середині серпня були зумовлені впливом одного і того ж синоптичного процесу. Аналіз траєкторій руху повітряних мас, побудованих за допомогою моделі HYSPLIT для висот 0.5, 1.5, 3, 4 і 5 км, показали проте, що не над усіма включеними у аналіз станціями AERONET підвищений вміст аерозолів був зумовлений саме стихійними лісовими пожежами на території Росії. Зокрема, аерозолі над Бельськом (Польща) були принесені повітряними масами з заходу, над Тиравере (Естонія) – з Азії через регіони сильних пожеж на південному сході України, тоді як забруднення над Москвою і Мінськом зумовлене саме пожежами у Росії. Аерозолі ж у атмосферу над рештою міст надходили на різних висотах і з території Росії, і з інших регіонів, де спостерігалися пожежі у цей же період, зокрема на південному сході України.

## ПОДЯКИ

Автори висловлюють подяку керівникам та іншим працівникам спостережних станцій AERONET Belsk, Bucarest, CLUJ\_UBB, Eforie, Minsk, Moldova, Moscow\_MSU\_MO, Sevastopol, Toravere за забезпечення роботи станцій та одержані спостережні дані, використані у цій роботі.

We thank the PI investigators and their staff for establishing and maintaining Belsk, Bucarest, CLUJ\_UBB, Eforie, Minsk, Moldova, Moscow\_MSU\_MO, Sevastopol, Toravere sites and data used in this investigation.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Birmili W., Schepanski K., Ansmann A., Spindler G., Tegen I., Wehner B., Nowak A., Reimer E., Mattis I., Müller K., Brüggemann E., Gnauk T., Herrmann H., Wiedensohler A., Althausen D., Schladitz A., Tuch T., and Löschau G. A case of extreme particulate matter concentrations over Central Europe caused by dust emitted over the southern Ukraine. *Atmos. Chem. Phys.*, 2008, vol.8, pp. 997-1016.
2. Bovchaliuk A., Milinevsky G., Danylevsky V., Goloub P., Dubovik O., Holdak A., Ducos F., Sosonkin M. Variability of aerosol properties over Eastern Europe observed from ground and satellites in the period from 2003 to 2011. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, vol.13, pp.6587–6602.
3. Bowman P., Lin C., Stohl A., Draxler R., Konopka P., Andrews A., Brunner D. Input Data Requirements Lagrangian Trajectory Models. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2013, vol.94, pp.1051–1058.
4. Chubarova N., Nezval' Ye., Sviridenkov I., Smirnov A., Slutsker I. Smoke aerosol and its radiative effects during extreme fire event over Central Russia in summer 2010. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2012, vol.5, pp.557–568.
5. Davies D.K., Ilavajhala S., Wong M.M., Justice C.O. Fire Information for Resource Management System: Archiving and Distributing MODIS Active Fire Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, vol.47 (1), pp.72-79.
6. Draxler R.R., Hess G.D. An overview of the HYSPLITp4 modeling system for trajectories, dispersion, and deposition. *Aust. Meteor. Mag.*, 1997, vol.47, pp.295–308.
7. Draxler R.R., Hess G.D. Description of the HYSPLIT-4 modeling system. *NOAA Tech. Memo*, 1997, ERL ARL-224, 25 p.
8. Dubovik O., King M. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements. *Journal of Geophysical Research*, 2000, vol.105, pp.20673-20696.
9. Dubovik O., Smirnov A., Holben B.N., King M.D., Kaufman Y.J., Eck T.F., Slutsker I. Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from Aerosol Robotic Network (AERONET) Sun and sky radiance measurements. *Journal of Geophysical Research*, 2000, vol.105, pp.9791–9806.
10. Hinds W. (Ed.). *Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles, 2nd Ed.* New York, Wiley, 1999. 504 p.
11. Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., Tanre D., Buis J.P., Setzer A., Vermote E., Reagan J.A., Kaufman Y.J., Nakajima T., Lavenu F., Jankowiak I., Smirnov A. AERONET - a federated instrument network and data archive for aerosol characterization, *Remote Sensing of Environment*, 1998, vol.66, pp.1 – 16.
12. Justice C.O., Giglio L., Korontzi S., Owens J., Morisette Roy D., Descloitres J., Alleaume S., Petitcolin F., Kaufman Y. The MODIS fire products, *Remote Sensing of Environment*, 2002, vol.83. pp.244 – 262.
13. Ramachandran B., Justice C.O., Abrams M.J. (Eds). *Land Remote Sensing and Global Environmental Change*. Springer, New York, 2011, 679 p.
14. Kokhanovsky A.A. *Aerosol optics. Light absorption and scattering by particles in the atmosphere*. Springer and Praxis Publishing, 2008, 146 p.
15. Kononov I.B., Beekmann M., Kuznetsova I.N., Yurova A., Zvyagintsev A.M. Atmospheric impacts of the

- 2010 Russian wildfires: integrating modelling and measurements of an extreme air pollution episode in the Moscow region. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, vol.11, pp.10031–10056.
16. Milinevsky G., Danylevsky V., Bovchaliuk V., Bovchaliuk A., Goloub Ph., Dubovik O., Kabashnikov V., Chaikovsky A., Miatselskaya N., Mishchenko M., Sosonkin M.. Aerosol seasonal variations over urban–industrial regions in Ukraine according to AERONET and POLDER measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2014, vol.7, pp.1459–1474.
  17. Péré J.C., Bessagnet B., Mallet M., Waquet F., Chiappello I., Minvielle F., Pont V., Menut L. Direct radiative effect of the Russian wildfires and its impact on air temperature and atmospheric dynamics during August 2010. *Atmos. Chem. Phys.*, vol.14, pp.1999–2013.
  18. Schroeder W., Prins E., Giglio L., Csiszar I., Schimdt C., Morisette J., Morton D. Validation of GOES and MODIS active fire detection products using ASTER and ETM+ data. *Remote Sensing of Environment*, 2008, vol.112, pp.2711–2726.
  19. Stohl A. Computation, accuracy and applications of trajectories – a review and bibliography. *Atmospheric Environment*, 1998, vol. 32, no.6, pp.947–966.
  20. Witte J.C., Douglass A.R., da Silva A., Torres O., Levy R., Duncan B.N. NASA A-Train and Terra observations of the 2010 Russian wildfires. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, vol.11, pp.9287–9301.
  21. Бовчалюк А.П. Вплив пожеж на розподіл аерозолу над Україною за даними супутникових та наземних вимірювань / А.П. Бовчалюк // Косм. наука і технологія. - 2013. - 19, № 5. - С. 27-41.
  22. Галицька Є.І. Науково-методичні аспекти використання Лагранжевої моделі HYSPLIT для побудови траєкторій повітряних потоків /Є.І. Галицька, С.І. Сніжко, В.О. Данилевський //Фізична географія та геоморфологія. – 2014. - Вип.1 (73).- С. 138-146.
  23. Калинин Д.В. Исследование особенностей оптических характеристик пылевого аэрозоля над Черным морем / Д.В. Калинин // Экологична безпека прибережної та шельфової зон та комплексне використання ресурсів шельфу: Зб. наук. пр. — Севастополь, 2012. — Вип. 26, том 2. — С. 151-162.
  24. Райст П. Аэрозоли. Введение в теорию: Пер. с англ. / П Райст. – Москва: Мир, 1987.- 280 с.
  25. Шевченко О.Г. Характеристика синоптических процессов над территорией Украины во время волны тепла в июле-августе 2010 г. /О.Г. Шевченко, Е.В. Самчук, С.И. Снежко // Ученые записки РГГМУ. - 2013. - № 29. - С. 85-94.
- ## REFERENCES
1. Birmili W., Schepanski K., Ansmann A., Spindler G., Tegen I., Wehner B., Nowak A., Reimer E., Mattis I., Müller K., Brüggemann E., Gnauk T., Herrmann H., Wiedensohler A., Althausen D., Schladitz A., Tuch T., and Löschau G. A case of extreme particulate matter concentrations over Central Europe caused by dust emitted over the southern Ukraine. *Atmos. Chem. Phys.*, 2008, vol.8, pp. 997-1016.
  2. Bovchaliuk A., Milinevsky G., Danylevsky V., Goloub P., Dubovik O., Holdak A., Ducos F., Sosonkin M. Variability of aerosol properties over Eastern Europe observed from ground and satellites in the period from 2003 to 2011. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, vol.13, pp.6587–6602.
  3. Bowman P., Lin C., Stohl A., Draxler R., Konopka P., Andrews A., Brunner D. Input Data Requirements Lagrangian Trajectory Models. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2013, vol.94, pp.1051–1058.
  4. Chubarova N., Nezval' Ye., Sviridenkov I., Smirnov A., Slutsker I. Smoke aerosol and its radiative effects during extreme fire event over Central Russia in summer 2010. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2012, vol.5, pp.557–568.
  5. Davies D.K., Ilavajhala S., Wong M.M., Justice C.O. Fire Information for Resource Management System: Archiving and Distributing MODIS Active Fire Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, vol.47 (1), pp.72-79.
  6. Draxler R.R., Hess G.D. An overview of the HYSPLITp4 modeling system for trajectories, dispersion, and deposition. *Aust. Meteor. Mag.*, 1997, vol.47, pp.295–308.
  7. Draxler R.R., Hess G.D. Description of the HYSPLIT-4 modeling system. *NOAA Tech. Memo*, 1997, ERL ARL-224, 25 p.
  8. Dubovik O., King M. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements. *Journal of Geophysical Research*, 2000, vol.105, pp.20673-20696.
  9. Dubovik O., Smirnov A., Holben B.N., King M.D., Kaufman Y.J., Eck T.F., Slutsker I. Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from Aerosol Robotic Network (AERONET) Sun and sky radiance measurements. *Journal of Geophysical Research*, 2000, vol.105, pp.9791–9806.
  10. Hinds W. (Ed.). *Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles*, 2nd Ed. New York, Wiley, 1999. 504 p.
  11. Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., Tanre D., Buis J.P., Setzer A., Vermote E., Reagan J.A., Kaufman Y.J., Nakajima T., Lavenu F., Jankowiak I., Smirnov A. AERONET - a federated instrument network and data archive for aerosol characterization, *Remote Sensing of Environment*, 1998, vol.66, pp.1 – 16.
  12. Justice C.O., Giglio L., Korontzi S., Owens J., Morisette Roy D., Descloires J., Alleaume S., Petitcolin F., Kaufman Y. The MODIS fire products, *Remote Sensing of Environment*, 2002, vol.83. pp.244 – 262.
  13. Ramachandran B., Justice C.O., Abrams M.J. (Eds). *Land Remote Sensing and Global Environmental Change*. Springer, New York, 2011, 679 p.
  14. Kokhanovsky A.A. *Aerosol optics. Light absorption and scattering by particles in the atmosphere*. Springer and Praxis Publishing, 2008, 146 p.
  15. Konovalov I.B., Beekmann M., Kuznetsova I.N., Yurova A., Zvyagintsev A.M. Atmospheric impacts of the 2010 Russian wildfires: integrating modelling and measurements of an extreme air pollution episode in the Moscow region. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, vol.11, pp.10031–10056.
  16. Milinevsky G., Danylevsky V., Bovchaliuk V., Bovchaliuk A., Goloub Ph., Dubovik O., Kabashnikov V., Chaikovsky A., Miatselskaya N., Mishchenko M., Sosonkin M.. Aerosol seasonal variations over urban–industrial regions in Ukraine according to AERONET and POLDER measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2014, vol.7, pp.1459–1474.
  17. Péré J.C., Bessagnet B., Mallet M., Waquet F., Chiappello I., Minvielle F., Pont V., Menut L. Direct radiative effect of the Russian wildfires and its impact on air temperature and atmospheric dynamics during August 2010. *Atmos. Chem. Phys.*, vol.14, pp.1999–2013.

18. Schroeder W., Prins E., Giglio L., Csizsar I., Schimdt C., Morisette J., Morton D. Validation of GOES and MODIS active fire detection products using ASTER and ETM+ data. *Remote Sensing of Environment*, 2008, vol.112, pp.2711-2726.
19. Stohl A. Computation, accuracy and applications of trajectories – a review and bibliography. *Atmospheric Environment*, 1998, vol. 32, no.6, pp.947 – 966.
20. Witte J.C., Douglass A.R., da Silva A., Torres O., Levy R., Duncan B.N. NASA A-Train and Terra observations of the 2010 Russian wildfires. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, vol.11, pp.9287–9301.
21. Bovchaliuk A. Vplyv pozhezh na rozpodil aerezolyu nad Ukrainoiu za danymy sputnykovykh ta nazemnykh vymiryuvan' [Fire impact on aerosol distribution over Ukraine from satellite and ground-based measurements]. *Kosm. nauka i tekhnolohiya. - Space science and technology*, 2013, vol.19, no.5, pp.27-41.
22. Galytska E., Snizhko S., Danylevsky V. Naukovometodychni aspekty vykorystannya Lagranzhevoi' modeli HYSPLIT dlya pobudovy trayektorii povitryanykh potokiv [Scientific methodological aspects of using Lagrangian Trajectory model HYSPLIT]. *Fizychna heografiya ta heomorfolohiya - Physical geography and Geomorphology*, 2014, vol.1 (73), pp.138-146.
23. Kalinskaya D.V. Issledovanie osobennostey opticheskikh kharakteristik pylevogo aerezolya nad Chernym morem [Research of optical characteristics features of dust aerosol over the Black Sea]. *Ekolohichna bezpeka pryberezhnoi' ta shel'fovoi' zon ta kompleksne vykorystannya resursiv shel'fu - Ecological safety of coastal and shelf zones and complex use of shelf resources*. Sevastopol, 2012, vol.2, pp.151-162.
24. Rajst P. Ajerozoli. Vvedenie v teoriju: per. s angl. [*Aerosols. Introduction to the theory: transl. from Engl.*]. Moskow: Mir, 1987. 280 p.
25. Shevchenko O., Samchuk E., Snezhko S. Kharakteristika sinopticheskikh protsessov nad territoriey Ukrainy vo vremya volny tepla v iyule-avguste 2010 g. [Characteristics of synoptic processes during heat wave in July-August 2010 in Ukraine]. *Uchenye zapiski RGGMU - Scientific notes of Russian state hydrometeorological university*, 2013, №29, pp.85-94.

## AEROSOLS DYNAMICS IN THE ATMOSPHERE OVER EASTERN EUROPE BY MEANS OF AERONET ACCORDING TO WEATHER CONDITIONS DURING SUMMER 2010

**E. Galytska<sup>1,2</sup>, Ph.D. student**  
**V. Danylevsky<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Phys.-Math.)**  
**S. Snizhko<sup>1</sup>, Dr Sci. (Geogr.)**

<sup>1</sup>-Taras Shevchenko National University of Kyiv;  
64/13, Volodymyrska Street, City of Kyiv, Ukraine, 01601, tempo2007@meta.ua

<sup>2</sup>- Bremen University, Institute of Environmental Physics  
Otto-Hahn-Allee 1, Bremen, Germany, 330440, egalytska@gmail.com

Introduction. Aerosols in the Earth's atmosphere are not only air pollutants but also a factor that affects the climate. The study of the dynamics of aerosol layer properties and aerosol particles properties, and revealing sources of the atmosphere pollution by aerosols is one of the urgent problems of modern environmental sciences. Monitoring of the air pollution caused by aerosols contributes to the determination of its effects on the climate and to the reduction of its negative impacts on the health of the population.

*The purpose* of this paper is to present the analysis of the dynamics of aerosols in the atmosphere over Eastern Europe. Thus, latest technologies and approaches are used: remote ground-based measurements of the optical properties of aerosol particles with the international sun photometers network AERONET; analysis of fires distribution during summer 2010 with the data application from satellite instrument MODIS; atmospheric dynamics research with the analysis of synoptic situation and modeling of transport of particles with the application of HYSPLIT model.

*Results.* The peculiarities of changes of aerosol optical depth at 500 nm spectral channel and Angstrom parameter 440-870 nm for 10 AERONET stations in Eastern Europe are discussed in the article. The authors provide complex analysis of aerosols distribution together with natural processes as forest fires and overview these processes considering weather conditions that were conducive for aerosols accumulation during that time. HYSPLIT back trajectories for mentioned stations in the altitude 0.5, 1.5, 3, 4 and 5 km are used as the improvement of results of synoptic analysis. Clear advantage of modelling of transport processes give the ability to receive detailed transport paths, which makes easier to distinguish the origin of aerosols.

*Conclusion.* Detailed research of aerosols with the application of up-to-date technologies makes the analysis of the optical properties of aerosols over large area quite efficient. The obvious effect of forest fires in European territory of Russia (UTR) on air quality of observational stations

of Ukraine, Russia, Moldova, Romania, Poland, Belarus and Estonia is detected and analysed. The further application of satellite measurements of optical properties of aerosols are attempted to be implemented to the further research.

**Keywords:** aerosols, AERONET, Eastern Europe, synoptic analysis, back trajectories, HYSPLIT.

## ДИНАМИКА АЭРОЗОЛЕЙ В АТМОСФЕРЕ НАД ВОСТОЧНОЙ ЕВРОПОЙ ПО ДАННЫМ АERONET ПОД ВЛИЯНИЕМ ПОГОДНЫХ УСЛОВИЙ В ТЕЧЕНИЕ ЛЕТА 2010

**Е.И. Галицкая**<sup>1,2</sup>, асп.,  
**В.А. Данилевский**<sup>1</sup>,  
**С.И. Снежко**<sup>1</sup>, д. геогр. н.

<sup>1</sup> Киевский национальный университет имени Тараса Шевченка,  
Украина, 01601, город Киев, ул. Владимирская, 64/13, tempo2007@meta.ua

<sup>2</sup> Бременский университет, Институт физики окружающей среды  
Германия, 330440, город Бремен, ул. Отто-Ханн-Аллее 1, egalytska@gmail.com

В работе представлены результаты анализа данных о спектральных оптических характеристиках аэрозолей в атмосфере над Восточной Европой по измерениям в международной сети солнечных фотометров AERONET, а также динамики пожаров растительности на этой территории летом 2010 года по данным спутникового прибора MODIS. Было выявлено и проанализировано влияние лесных пожаров, горения торфа и травяного покрова на содержание, динамику и свойства атмосферного аэрозоля над Украиной и прилегающими регионами с учетом развития синоптической ситуации и перемещений атмосферных масс. Для исследований путей перемещений аэрозолей в атмосфере были использованы обратные траектории движения воздушных масс к местам наблюдений, вычисленные с помощью модели HYSPLIT для высот 0.5, 1.5, 3, 4 и 5 км. Показано, что повышенное содержание аэрозолей над наблюдательными станциями AERONET, расположенными на территории Украины, России, Молдовы, Румынии, Польши, Беларуси и Эстонии, совпавшее по времени с периодом сильных лесных пожаров на Европейской территорией России (ЕТР), в разные периоды с середины июля до середины августа 2010 над различными территориями было обусловлено пожарами как на ЕТР, так и на юго-востоке Украины, в Молдове и Польше.

**Ключевые слова:** аэрозоли, AERONET, Восточная Европа, синоптический анализ, обратные траектории, HYSPLIT.

*Дата першого подання:* 27.09.2015

*Дата надходження остаточної версії:* 06.05.2016

*Дата публікації статті:* 04.07.2016