

**УДК 551.510.411**

**Дворецька І. В.**

Український науково-дослідний гідрометеорологічний інститут

## **АТМОСФЕРНИЙ АЕРОЗОЛЬНИЙ ФОН НАД МІСТОМ КИЄВОМ**

Визначено географічний розподіл вмісту аерозолію над територією м. Києва. Вказано сезонний хід концентрації аерозолів. Досліджувалась також довготермінова динаміка аерозольної оптичної товщі над територією Європи.

**Ключові слова:** аерозоль, повітря, концентрація, Київ, динаміка.

Атмосферним аерозолем називаються [6] такі дисперсні системи, що складаються з часток твердої (пил, дим, тощо) або рідкої (тумани, хмари) речовини, які знаходяться в зваженому стані в атмосферному повітрі. Зрозуміло, що аерозольні частки можуть потрапляти в атмосферу як з т.з. первинних джерел, тобто з поверхні землі та океану, так і безпосередньо утворюватись в атмосферному повітрі (з т.з. вторинних джерел). Основними джерелами аерозолію в атмосфері [4] є поверхні суходолу, морів і океанів, метеоритні потоки, лісові пожежі, хімічні та фотохімічні реакції в атмосфері та рослинному покриві, господарська діяльність людини, вулкани. Таким чином, за джерелами походження глобальний аерозольний фон [3] в тропосфері формується за рахунок ґрунтово-ерозійного, морського та внутрішньо-атмосферного походження, в стратосфері – частками внутрішньо-атмосферного та космічного походження.

Загалом, аерозольні частки будь-якого походження зазвичай мають малу швидкість осідання, тому у зваженому стані в атмосфері можуть знаходитись досить довго. Крім класифікації за джерелами походження, атмосферний аерозоль також класифікують за розміром часток. Так, виділяють [6]: ядра Айткена (або мікродисперсна фракція) мають розміри менше 0,1 мкм, субмікронна фракція – частки з розмірами до 1 мкм, гігантські частки (або грубодисперсна фракція) – частки за радіусом більше 1 мкм. Окремо виділяють ядра конденсації, а також частки опадів, туманів та хмар. Виводиться аерозоль з атмосфери зазвичай шляхом седиментації, тобто осідання аерозольних часток на земну поверхню. Дрібні аерозольні частки також можуть бути ядрами конденсації і вимиватися з атмосфери опадами.

Якщо проводити паралель між аерозолем природного та антропогенного походження, то останній має набагато менше значення для атмосферних та кліматичних процесів. Такий аерозоль має досить велику вагу часток та невелику висоту викиду, тому він швидко виноситься з атмосфери. Проте, недооцінювати такий аерозоль також неможна [5], адже його кількість над землею поверхнею майже постійна, а для промислових центрів та великих міст антропогенний аерозольний фон відіграє досить суттєву роль.

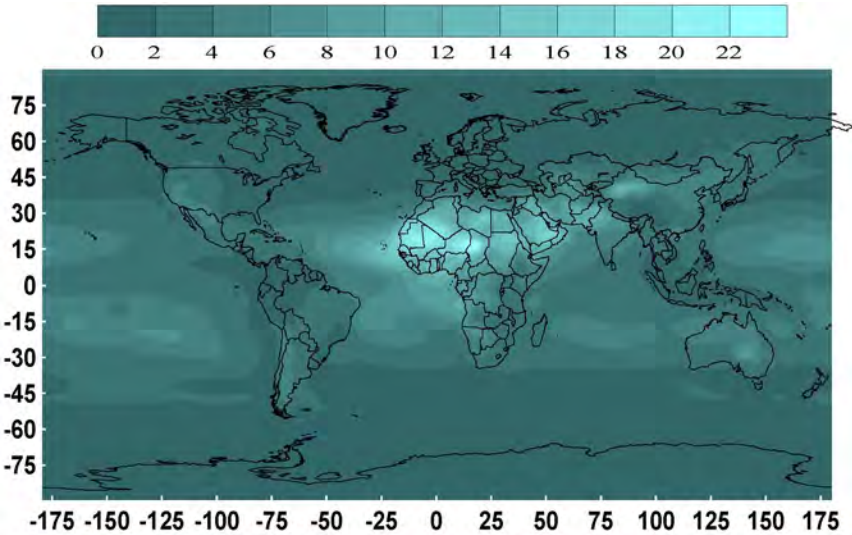
Вплив атмосферного аерозолу на клімат обумовлений його оптичними властивостями. Розсіюючи та поглинаючи сонячне випромінювання, стратосферний аерозоль також поглинає зустрічне випромінювання Землі, посилюючи парниковий ефект і викликаючи зміни термічного характеру. В свою чергу, надходження тепла за рахунок поглинання сонячного випромінювання [1] оптично-активним аерозолем може змінювати просторову структуру мезомасштабної циркуляції і породжувати неоднорідність полів висхідних течій.

Існує велика кількість методів спостережень за вмістом аерозолу в атмосфері, основними з яких є наземні і супутникові.

Для аналізу глобального та регіонального розподілу аерозолу послідовно використовувались дані TOMS [8], який функціонував на таких супутниках як Earth Probe (з листопада 1978 до квітня 1995), Метеор 3 (з травня 1995 до серпня 1996), Nimbus 7 (з серпня 1996 до серпня 2003) та Omi (з серпня 2003 і до тепер). Нажаль, КА Метеор 3 не був прив'язаний до сонячно-синхронної орбіти. Найчастіше дані,

отримані з таких супутників, не використовуються в дослідженнях, вони були опущені і під час написання даної роботи. Враховуючи істотне зменшення наявних даних аерозолію в останній період (після введення в експлуатацію восьмої версії баз даних) для досліджень розподілу аерозолію в атмосфері над містом Києвом, було використано ряди даних з 1978 до 2008 рр., які є кліматично представницькими.

Загалом, географічний розподіл аерозолію для земної кулі характеризується такими особливостями (рис. 1):



**Рис. 1. Глобальний географічний розподіл концентрації аерозолів**

- середнє значення аерозольного індексу змінюється зонально: від максимальних значень в тропічній зоні (вище 20) до мінімальних (близько 0) – в помірних і полярних регіонах;

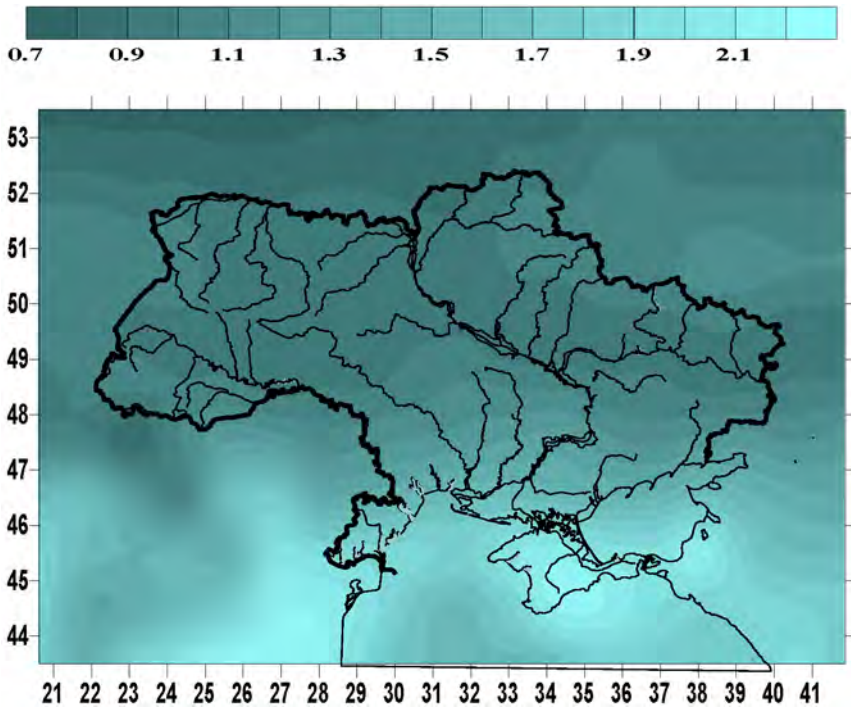
- окремо виділяються максимальні значення в районах найбільших пустель нашої планети (Калахарі, Гобі, Тар, Долина смерті, пустелі Аравійського півострова та австралійські пустелі), а, особливо, в районі Західної Сахари;

- підвищеними значеннями аерозольного індексу характеризується смуга від 30° пн.ш. до 45° пд.ш. в океанах, на материках ця

смуга переривається.

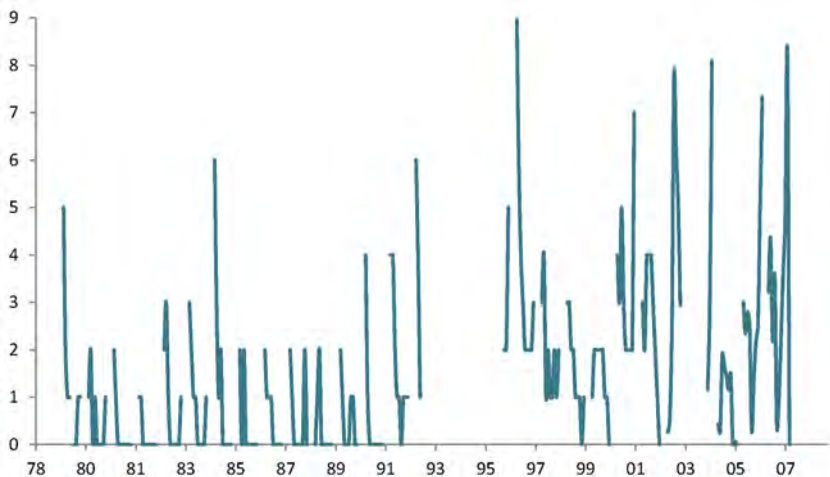
Отримані особливості легко пояснюються особливостями утворення та поширення аерозолію. Характерний для пустель ґрунтовий аерозоль добре фіксується супутником через безхмарну атмосферу тропічних широт. Щодо області підвищених значень аерозолію в тропічних широтах, то вона повністю співпадає із зонами поширення океанічних течій: Південна пасатна (нейтральна), Перуанська (холодна), Ель-Ніньо (тепла), Канарська (холодна), Мінданао (нейтральна) та ін.

Географічний розподіл аерозолію над територією України загалом має закономірності характерні для всієї земної кулі – концентрація аерозолію збільшується майже зонально при просуванні з півночі на південь від 0,7 до 2,5. За даними, отриманими для території України середнє вмісту аерозолію в атмосфері над містом Києвом лежить в межах 1,3 – 1,5 (рис. 2).



**Рис.2. Географічний розподіл концентрації аерозолів над територією України**

За даними супутникових досліджень аерозольний фон над Києвом істотно змінювався в продовж останніх десятиліть. Це яскраво ілюструє наступний рисунок (рис. 3). На ньому можна виділити два основні інтервали: період до квітня 1993 року і, після перерви в даних, з серпня 1996. В першому періоді амплітуди коливань концентрації аерозолію в атмосфері рідко перевищують 2, а самі коливання є досить чіткими, їх характер мало змінюється в часі. На фоні невеличкого середнього значення (0,79) і стандартного відхилення 1,24 можна виділити два піки 1984 та 1992 років, які співпадають в часі з процесами осідання продуктів виверження вулканів Ель-Чічон (виверження відбулось в березні 1982) і Пінатубо (виверження – червень 1991). Як відомо, продукти виверження вулканів потрапляють на великі висоти. З часом, за рахунок сил гравітації великі за розміром часточки починають опускатися, а дрібні – деякий час ще знаходяться на висотах. Але з часом вони укрупнюються за рахунок процесів конденсації, сублімації та коагуляції і теж починають рухатися вниз. Саме тому максимальна концентрація аерозолію в атмосфері відмічається через кілька місяців (а, в деяких випадках, і років) після виверження.



**Рис.3. Аерозольний фон над містом Києвом за весь період спостережень**

Це яскраво ілюструють зміни концентрації аерозолів після виверження вулкану Пінатубо, яке призвело до потрапляння в атмосферу майже 30 Мт стратосферного вулканічного аерозолу. Загалом, після виверження планетарний вміст аерозолу [2] в атмосфері збільшився майже 1,5 рази з 2,6 до 3,9, для помірних широт Північної півкулі таке збільшення виявилось надзвичайно великим – з 0,2 до 3,5. Для України вміст аерозолу в атмосфері збільшився в 3 рази – з 0,9 до 2,7. Загалом, для території України таке збільшення виявилось дещо меншим у порівнянні з іншими регіонами помірних широт Північної півкулі, адже в сучасний період на території України дія антропогенних джерел фактично набула характеру нестационарному процесу. Тому збільшення вмісту аерозолу в атмосфері над територією України в сучасний період є меншим у порівнянні з іншими регіонами. Максимальне значення вмісту аерозолу в атмосфері за весь період спостережень над містом Києвом спостерігається в лютому 1997 р. і становить 9, за часовим охопленням співпадає з осіданням продуктів виверження Пінатубо (необхідно зазначити, що ряди даних з травня 1994 до серпня 1996 мають проміжок).

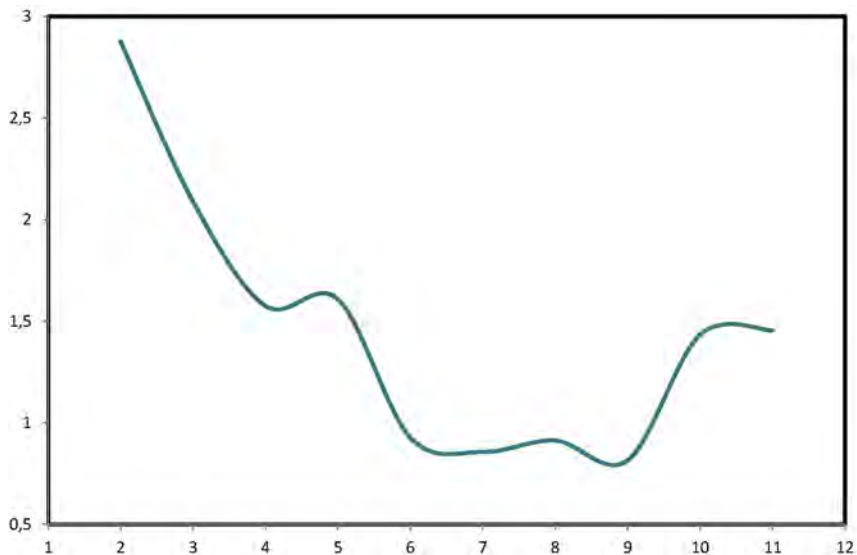
Проте, і після другої хвилі осідання продуктів виверження глобальний аерозольний фон продовжує істотно коливатись до неймовірних абсолютних значень. Так, в атмосфері над Києвом відмічаються істотні зміни концентрації аерозолу, що виражені у різких і безсистемних коливаннях з надзвичайно великими амплітудами. Середнє значення вмісту аерозолу в другому періоді вже становить 2,53 зі стандартним відхиленням 1,96, а амплітуди коливань досягають 7. Деякою мірою, це можна пояснити наслідками виверження вулкану Пінатубо, але такі істотні зміни, які розтяглися на десятиліття, не міг спричинити один процес. Інших можливих причин доволі багато, проте природа деяких з них настільки складна, що потребує великої кількості додаткових досліджень. Варіанти можуть бути такі: збільшення потоків метеоритної або кометної речовини в атмосферу, активізація лісових пожеж, збільшення турбулентності в стратосфері і обумовлене ним створення умов рівноважного існування для більших аерозольних часток. Загальновідома думка про антропогенне забруднення атмосфери також має право на існування, хоча масштаби антропогенних впливів складно порівнювати з іншими наведеними чинниками. Так,

антропогенний вплив втрачає своє значення на фоні таких факторів, як виверження вулкану Пінатубо та у порівнянні з глобальними геофізичними факторами. Крім того, сучасне збільшення та коливання вмісту аерозолію в атмосфері відмічається після 2000 року, тобто в той період, коли вже вступили в дію положення Монреальського протоколу, що призвело до помітного зменшення промислових викидів.

В сезонному ході концентрації аерозолів в атмосфері над Києвом відмічається один максимум, що припадає на зимові місяці і становить 2,88 в лютому. Нажаль, як було сказано вище, дані за листопад, грудень і січень отримати неможливо. Після досягнення максимуму в лютому вміст аерозолію в атмосфері поступово зменшується до досягнення мінімуму літом і на початку осені (0,81 в вересні). Причинами таких сезонних змін можуть бути як антропогенні, так і динамічні фактори. До перших можна віднести збільшення виробничих потужностей впродовж осені та зими і зменшення викидів в період літніх канікул. Загалом такий характер сезонного ходу над містом вказує на існування потужних аерозольних джерел антропогенного походження. Дія динамічних факторів обумовлена особливостями синоптичних процесів. Так, взимку над Києвом спостерігається поле зниженого тиску, яке завдяки низхідним рухам повітря запобігає перенесенню аерозолію в високі шари атмосфери і, таким чином, посилює зимовий максимум вмісту аерозолію. Влітку, навпаки, потужні висхідні рухи повітря виносять аерозоль в високі шари атмосфери і посилює літній мінімум. Ще однією причиною існування саме таких екстремумів сезонного ходу вмісту аерозолію є збільшення хмарності в зимовий період. Адже часточки хмар також є аерозолем і добре фіксуються з супутника. Загалом в сезонному ході над містом Києвом середнє значення становить 1,45, а амплітуда коливань складає 2 (рис. 4).

Таким чином, аерозольний фон над містом Києвом є близьким до очікуваного і обумовлюється його географічним положенням по відношенню до основних аерозольних джерел. Основні його параметри лежать в межах значень, характерних для території України, а особливості довготривалих змін повністю узгоджуються з глобальними процесами перенесення аерозольних домішок в атмосфері. Проте, особливості сезонних змін є наслідком дії потужних антропогенних джерел аерозолію, які розміщені в межах





**Рис. 4. Сезонний хід вмісту аерозолію над м. Києвом**

міста.

Зважаючи на малу кількість даних вимірювань Омі в останній період (мова про це йшла вище) для аналізу динаміки вмісту аерозолію в останні роки було використано дані наземної мережі станцій AERONET, яка на території України представлена п'ятьма станціями (табл. 1).

З таблиці видно, що станція Київ має один з найдовших рядів спостережень і її дані можуть бути використані для

*Таблиця 1*

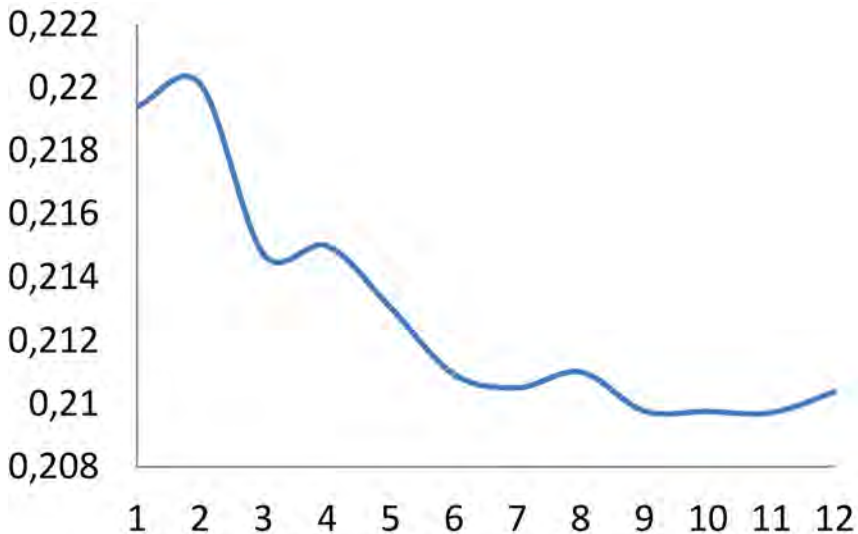
**Мережа АЕРОНЕТ над територією України**

Станція	Широта	Довгота	Початок спостережень
<b>Київ</b>	50.364	30.497	23.04.2007
<b>Луганськ</b>	48.570	39.365	19.11.2011
<b>Євпаторія</b>	45.215	33.142	03.09.2012
<b>Донецьк</b>	48.021	37.809	26.07.2012
<b>Севастополь</b>	44.616	33.517	01.01.2006

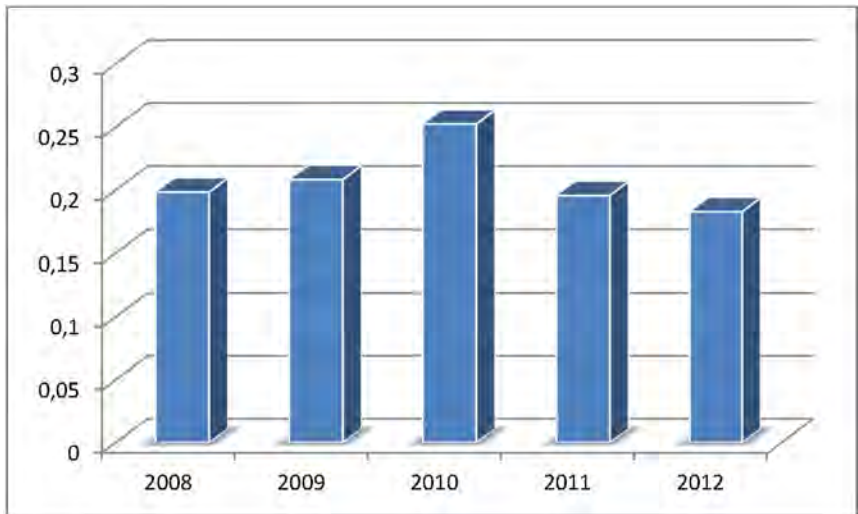


дослідження динаміки вмісту аерозолію в останні 5 років. Необхідно також зазначити, що система спостережень АЕРОНЕТ надає дані аерозольної оптичної товщі, саме такі дані ми будемо використовувати в подальшому. На рисунку 5 представлено сезонний хід аерозольної оптичної товщі (АОТ) в місті Києві за період з квітня 2007 до грудня 2012 включно. Середні показники АОТ над містом Києвом становлять 0,212, а розмах коливань 0,2. Максимальні значення спостерігаються взимку та навесні, мінімальні – восени. Такий сезонний хід пов'язаний з атмосферною циркуляцією і є наслідком переважання циклонічної погоди взимку. При порівнянні отриманих даних з кліматичними нормами, визначеними за період 1978 – 2008 рр. за даними TOMS та Omi (рис. 4), було виявлено істотне співпадіння конфігурації сезонного ходу, проте існують відмінності в абсолютних показниках. Так, для сучасного періоду (2007 – 2012 рр.) характерним є менший розмах сезонних коливань та менші абсолютні значення АОТ.

При порівнянні середньорічних значень аерозольної оптичної товщі за всі роки спостережень (рис. 6) було виявлено невелике зменшення даного показника в останні роки.



**Рис. 5. Сезонний хід аерозольної оптичної товщі атмосфери в м. Києві**

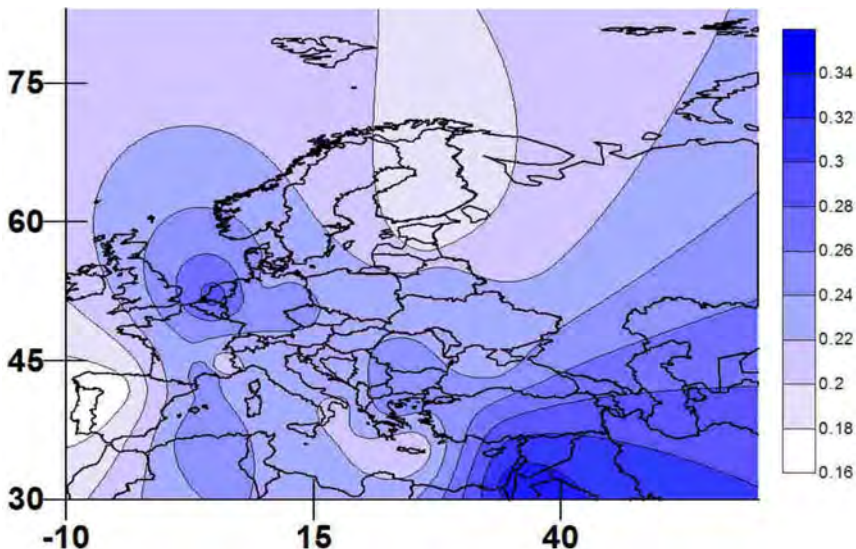


**Рис. 6. Середньорічні значення аерозольної оптичної товщі в м. Києві за даними АЕРОНЕТ**

Враховуючи невелику кількість станцій системи АЕРОНЕТ на території України до аналізу сучасної динаміки АОТ було залучено станції Європи з рядами спостережень більше 5-ти років. Система АЕРОНЕТ в Європі налічує близько 40 таких станцій, при чому період спостережень на більшості з них сягає 10 років.

Географічний розподіл середніх значень аерозольної оптичної товщі над територією Європи (рис. 7) є близьким до очікуваного, максимальні значення спостерігаються в південній частині. Збільшення аерозольної оптичної товщі на півдні пов'язане, в першу чергу, зі збільшенням частки грубодисперсного еруптивного аерозолю пустельного походження, який простежується на всіх картах планетарного масштабу (рис. 1).

Біля східних узбереж Європи простежується також аерозоль океанічного походження, що проявляється не так істотно в планетарному масштабі, проте добре виражений на регіональному рівні. Тут слід зазначити, що невеликі значення аерозольної оптичної товщі біля узбережжя Португалії, які добре простежуються на рис. 7, скоріше за все є наслідком проходження Карибської холодної течії в даному регіоні і, внаслідок цього, відсутності істотного випаровування з поверхні океану. Згідно попереднього

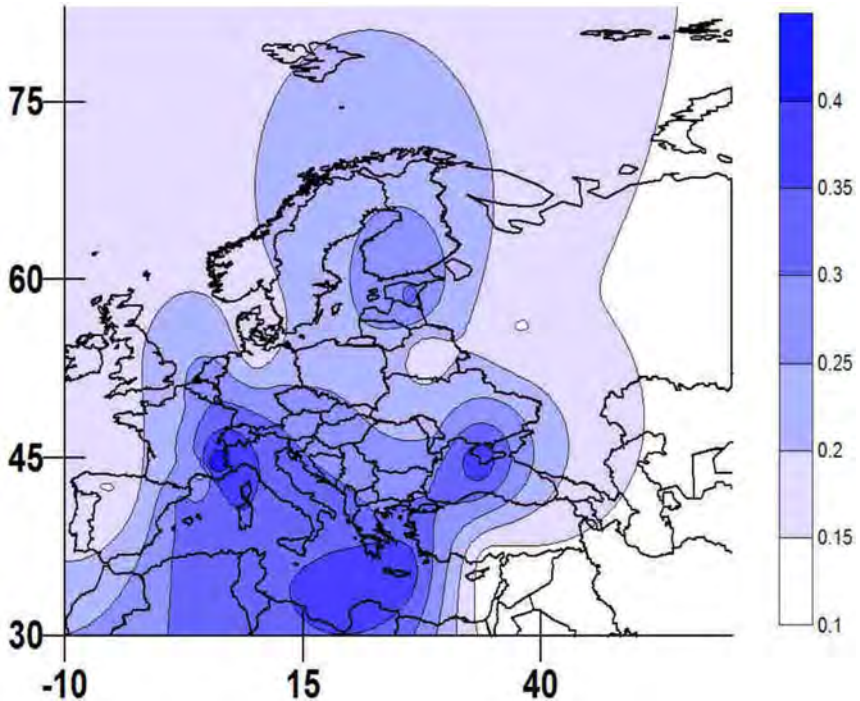


**Рис. 7. Географічний розподіл середніх значень аерозольної оптичної товщі атмосфери над територією Європи за даними АЕРОНЕТ**

аналізу, можна відмітити, що збільшення аерозольної оптичної товщі в географічному розподілі за рахунок антропогенних факторів не виражене. Проте, дослідження чинників розподілу аерозолі є складною проблемою, яка не може бути вирішена шляхом поверхневого аналізу, тому має стати метою наступних досліджень.

Сезонний хід АОТ над територією Європи (рис. 8) виражений несуттєво.

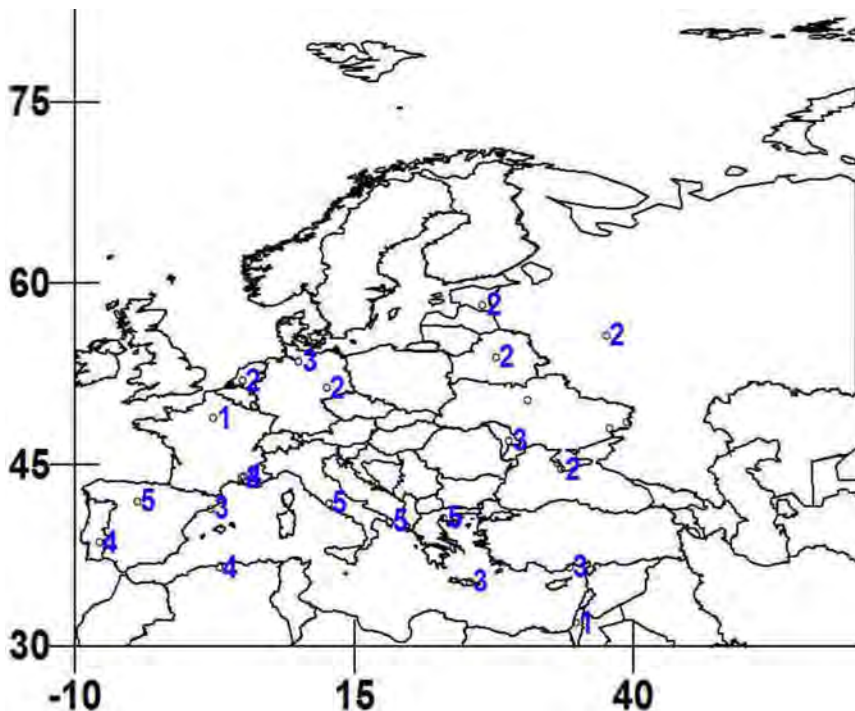
Найбільші показники коефіцієнту детермінації сезонного ходу характерні для європейського півдня та заходу, що є наслідком сезонності в роботі теплової машини другого роду, яка добре прослідковується на узбережжі. Важливим фактором також є західне перенесення повітряних мас. Цікаво відмітити, що області з найбільшими значеннями коефіцієнтів детермінації сезонного ходу територіально співпадають з областями розповсюдження гармонік вищого порядку (рис. 9). Такі особливості можуть бути наслідком складності циркуляційних процесів місцевого значення та особливостей випаровування з поверхні океану в місцях



**Рис. 8. Географічний розподіл коефіцієнту детермінації сезонного ходу аерозольної оптичної товщі над територією Європи за даними АЕРОНЕТ**

найбільших джерел аерозолю, якими є Сахара та океан.

Дослідження довготермінової динаміки аерозольної оптичної товщі дало несподіваний результат: аерозольна оптична товща над територією Європи, в загальному, зменшується. Тренди середньорічних значень аерозольної оптичної товщі (рис. 10) майже на всіх станціях Європи є від'ємними. Тільки три європейські станції характеризуються додатними значеннями трендів: Москва, Мінськ та Авіньйон (Франція). Щодо перших двох станцій, серед причин збільшення АОТ можна вказати антропогенний вплив. Причини збільшення аерозолю у Франції поки не визначені, проте для цієї станції значення позитивного тренду є досить низькими. Цікавою особливістю є також той факт, що тільки для станцій Москва і Мінськ значення коефіцієнтів детермінації лінійного і поліноміального (в ступені 2) трендів майже збігаються. Для інших станцій характерне



**Рис. 9. Географічний розподіл гармонік сезонного ходу аерозольної оптичної товщі над територією Європи за даними АЕРОНЕТ**

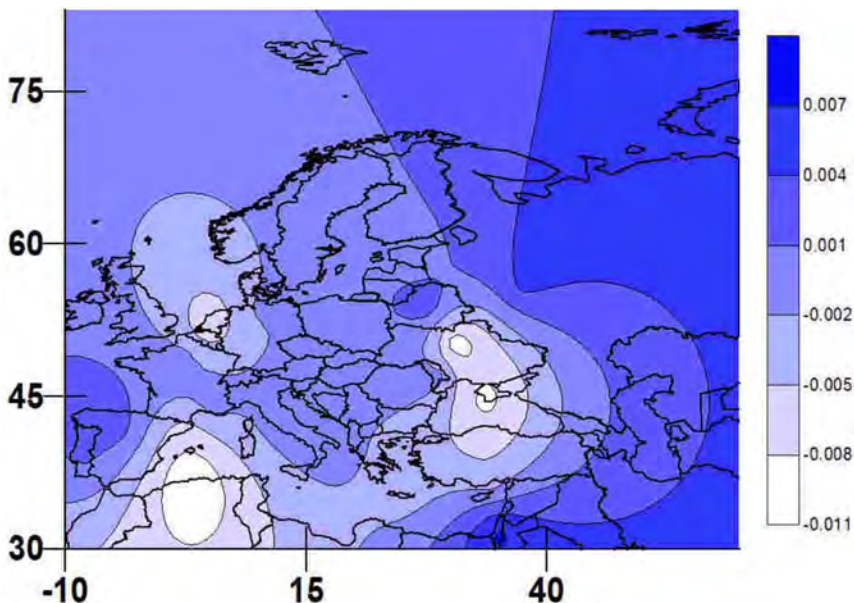
істотне переважання коефіцієнту детермінації поліноміального тренду (рис. 11), що вказує на коливальний характер сучасних змін. Як видно з рисунку, найвищі коефіцієнти детермінації характерні для від'ємних трендів, проте позитивний тренд станції Москва є також досить значущим.

Ще однією цікавою особливістю, яка поки не знайшла пояснень, є те, що переламним моментом майже на всіх станціях став 2007 р., при чому наявність переламного моменту саме в цьому році існує у станцій з різними за інтервалом спостережень рядами даних. Можливо, такі зміни є наслідком міжнародних угод, проте, таке припущення вимагає додаткових досліджень.

В результаті досліджень були отримані наступні висновки:

1. Географічний розподіл вмісту аерозолію над територією України визначається його глобальним розподілом і є близьким до





**Рис. 10. Географічний розподіл трендів середньорічних значень аерозольної оптичної товщі над територією Європи за даними АЕРОНЕТ**

очікуваного.

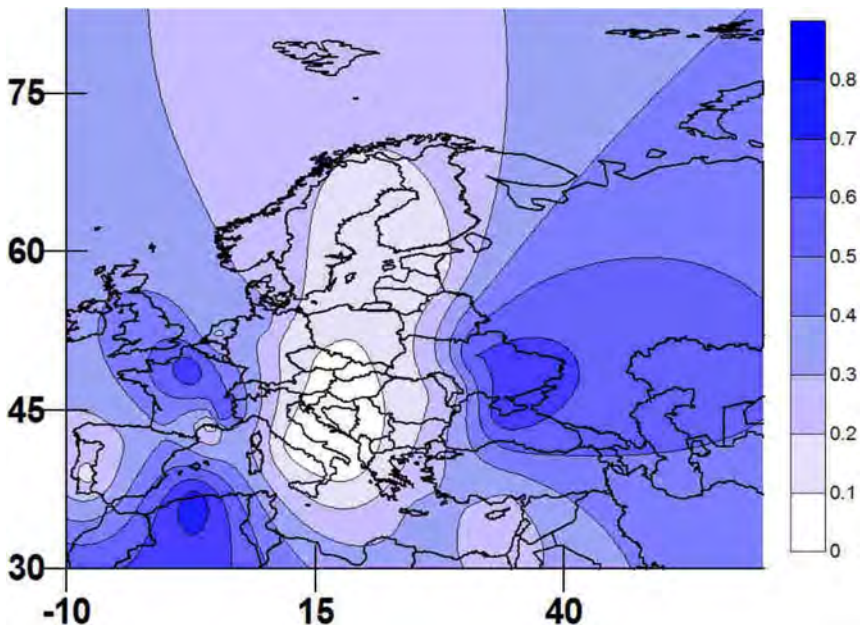
2. Останні десятиліття вміст аерозолію над Києвом істотно збільшувався, проте за даними системи АЕРОНЕТ починаючи з 2010 року було відмічене деяке зменшення аерозольної оптичної товщі.

3. Поступове зменшення АОТ відмічається майже на всіх станціях АЕРОНЕТ у Європі, а тренди такого зменшення є статистично значущими, що дає можливість робити прогноз на майбутнє.

**Рецензент – доктор фізико-математичних наук, професор  
Г. М. Крученицький**

#### **Література:**

1. Возможности оценки вклада динамических факторов в пространственные и временные колебания общего содержания озона в высоких широтах / И. Н. Иванова, В. Г. Кидиярова, Н. Н. Фомина,



**Рис. 11. Географічний розподіл коефіцієнтів детермінації поліноміального тренду (в ступені 2) середньорічних значень аерозольної оптичної товщі над територією Європи за даними АЕРОНЕТ**

И. А. Щерба // Материалы Всесоюзного совещания «Численное моделирование состава и динамики свободной атмосферы». – 1991. – С. 146 – 150.

2. Дворецька, І. В. Особливості сучасної динаміки концентрації аерозолів в земній атмосфері // Збірник наукових праць військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – 2006. – вип. 5. – С. 219 – 228.

3. Ивлев, Л. С. Оптические свойства атмосферных аэрозолей / Ивлев Л. С., С. Д. Андреев. – Л. : Изд-во ЛГУ, 1986. – 358 с.

4. Ивлев, Л. С. Физика атмосферных аэрозольных систем / Л. С. Ивлев, Ю. А. Довгалюк. – С.-Пб., 1999. – 258 с.

5. Изменения глобального климата. Роль антропогенных воздействий / Ю. А. Израэль, Г. В. Груза, В. М. Катцов, В. П. Мелешко // Метеорология и гидрология. – 2001. – №5. – С. 5 – 21.

6. Кабанов, М. В. Рассеяние оптических волн дисперсными



середями. Часть III. Атмосферный аэрозоль / М. В. Кабанов, М. В. Панченко. – Томск, 1984. – 189 с.

7. Aerosol optical dept [Electron source] – Access mode: <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>

8. Toms Data and Images [Electron source] – Access mode: <http://toms.gsfc.nasa.gov>

И. В. Дворецкая

### **АТМОСФЕРНЫЙ АЭРОЗОЛЬНЫЙ ФОН НАД ГОРОДОМ КИЕВОМ**

Определено географическое распределение содержимого аэрозоля над территорией г. Киева. Указан сезонный ход концентрации аэрозолей. Исследовалась также долгосрочная динамика аэрозольной оптической толщи над территорией Европы.

**Ключевые слова:** аэрозоль, воздух, концентрация, Киев, динамика.

I. Dvoretzka

### **ATMOSPHERE AEROSOL BACKGROUND ABOVE KYIV CITY**

There is defined a geographical distribution of aerosol content on Kyiv territory. The season course of aerosol concentration is pointed. Also the long-term dynamics of aerosol optical thickness above Europe territory was investigated.

**Keywords:** aerosol, air, concentration, Kyiv, dynamics.

Надійшла до редакції 28 лютого 2013 р.