

# АВТОМАТИКА ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ВІМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА

УДК 681.785.5:504.3

**А. П. Іванов, д. ф.-м. н., проф., член-кор. НАН Беларусі;  
А. П. Чайковський; І. В. Васильківський, к. т. н., доц.;  
В. Г. Петрук, д. т. н., проф.; С. М. Кватернюк, асп.**

## ЛІДАРНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ АТМОСФЕРНОГО АЕРОЗОЛЮ

*Розглянуто результати проведення лідарного екологічного моніторингу атмосферного аерозолю з використанням лідарно-локальних методів дослідження.*

### Вступ

Розробка методів моніторингу і контролю оптичних, мікрофізичних і метеорологічних характеристик атмосфери має важливе значення для вивчення процесів і складу атмосфери. Застосування класичних методів контролю повітря має велику кількість принципових недоліків, таких як: трудомісткість (для кожної вимірюваної компоненти свій метод і прилад), тривалість обробки проби, мала кількість і недоступність деяких (як правило, висотних) точок спостереження. Все це обмежує можливості здійснення моніторингу забруднення великих об'ємів атмосфери тільки класичними методами. А такий моніторинг необхідний у великих промислових центрах, містах, регіонах для вирішення завдань метеорології, кліматології, трансграничного переносу забруднень, охорони навколишнього середовища тощо. Тому для розв'язання задач екологічного моніторингу атмосфери, проведення експрес-аналізу локальних джерел забруднення найбільшу ефективність мають лідарно-локальні методи дослідження.

*Метою роботи є демонстрація можливостей лідарного екологічного моніторингу атмосфери у дослідженні структури атмосферного аерозолю.*

### Застосування лідарних систем екологічного моніторингу атмосфери

Аерозолі впливають на тепловий і радіаційний режим атмосфери. У містах аерозолі антропогенного походження знижують сонячну радіацію на 10...20 %. Середній коефіцієнт прозорості в містах на 2...5 % менший, ніж у сільській місцевості. Для аерозолів властиво поглинання радіації в діапазоні 8...12 мкм, що зумовлює в містах зменшення вночі ефективного випромінювання підстилаючої поверхні. Внаслідок цього відбувається збільшення температури приземного шару, ослаблення приземної і утворення піднятої над аерозольним шаром температурної інверсії.

Визначення концентрації та спектра частинок аерозолів за розмірами необхідно для контролю процесів: зміни аерозолів з їх розповсюдженням від локальних джерел забруднень; конденсації вологи на аерозолях та утворення твердих аерозолів в результаті хімічних реакцій між газовими складовими. Атмосферні процеси сприяють утворенню в міському смогу твердих часток нітратів та сульфатів. Паралельно з визначенням мікроструктури аерозолів — методом резонансної флуоресценції — можна досліджувати їх хімічний склад.

За деяких метеумов аерозолі антропогенного походження можуть інтенсифікувати опади, або спричиняти до перерозподілу аерозольних частинок у хмарах. Вплив хмарності на приземну концентрацію газових забруднень проявляється перш за все у поглинанні домішок водяними краплями. В результаті виникає необхідність визначення структури нижньої межі водності і фазового стану хмар. Вимірювання цих параметрів зі спільним вивченням характеристик газових і аерозольних домішок дозволяє визначити особливості взаємодії

хмарних мас над містом із забруднюючими речовинами антропогенного походження.

Відомо, що тумани в містах виникають частіше, ніж поза ними. Густі і тривалі тумани підвищують забрудненість повітря, тому що домішки, що поглинаються водяними краплями, розчиняючись, утворюють нові, іноді токсичніші речовини. Основними параметрами туманів є: інтенсивність, просторовий розподіл, водність, які можна аналізувати лідарно-локаційними методами.

Стандартні параметри атмосфери вимірюються традиційними засобами. На фонових лідарних станціях завданнями спостереження є: накопичення статистичних даних про прозорість атмосфери в різних спектральних діапазонах, про інтенсивність і висоту появи аерозольних шарів в тропосфері і стратосфері з подальшим встановленням зв'язку просторово-часової мінливості мікроструктури аерозолі і термічного режиму атмосфери; визначення малих варіацій вуглекислого газу в атмосфері і зв'язку цих варіацій з термічним режимом атмосфери; визначення газового складу тропосфери і стратосфери для з'ясування дислокації газових антропогенних домішок в атмосфері Землі.

В залежності від специфіки завдання застосовуються лідарні системи, які володіють різним технічним потенціалом, стаціонарні і пересувні, що розташовуються на транспорті, на човнах, в літаках, на космічних апаратах [1–4]. Широкий діапазон зміни технічних параметрів лідарних систем дозволяє вирішувати такі завдання:

- контроль концентрації газів природного і антропогенного походження на рівні ГДК і нижче;
- контроль параметрів атмосфери поблизу локальних джерел забруднення (промислових об'єктів);
- контроль якості повітря в масштабах міста, району, регіональний і глобальний моніторинг атмосфери;
- дослідження оптичних характеристик атмосфери, що визначають радіаційний режим і клімат Землі;
- контроль концентрації, середнього розміру, форми, полідисперсності частинок аерозолі, показника заломлення ( $n$  в ряді випадків і хімічного складу);
- вимірювання напрямку, величини і швидкості вітру, густини повітря, тиску, профілю температури, вологості на різних ділянках атмосферного простору. На рис. 1 показана схема використання лідарних систем у глобальному екологічному моніторингу.

Лідарні системи мають такі властивості: експресність (можливість безперервного контролю в режимі реального часу); високу інформативність (можливість отримання масиву даних, які дозволяють виявляти основні закономірності забруднення міста, промислового району, заповідника тощо); високу просторову (до декількох метрів) роздільну здатність вимірюваних параметрів; дальню порядку метеорологічної дальності видимості (до 2...30 км) у всьому просторі контролю; неконтактність і прихованість (інформацію про характер забруднення об'єму атмосферного повітря можна отримувати на великій відстані і без отримання дозволу адміністрації виробництва).

Фізичною основою інформативності методів лідарного моніторингу є відома багатопараметрична залежність характеристик розсіяного випромінювання від властивостей атмосферного середовища.

### Трансформація лазерного випромінювання в атмосферному середовищі

Енергетичне послаблення електромагнітного випромінювання атмосферою зумовлено, головним чином, його поглинанням і розсіюванням молекулами газів і різноманітних аерозольних частинок. При цьому виникає необхідність у вимірюванні розподілу в просторі таких параметрів, як показники послаблення, розсіяння атмосфери, концентрації, розміру, форми і складу аерозольних частинок. Закон поглинання Бугера для однорідного стовпа атмосфери описується рівнянням [2].

$$I(l) = I_0 \exp(-\alpha l), \quad (1)$$

де  $I_0$  – початкова інтенсивність випромінювання;  $I(l)$  – інтенсивність після проходження деякої відстані;  $\alpha$  – коефіцієнт поглинання.

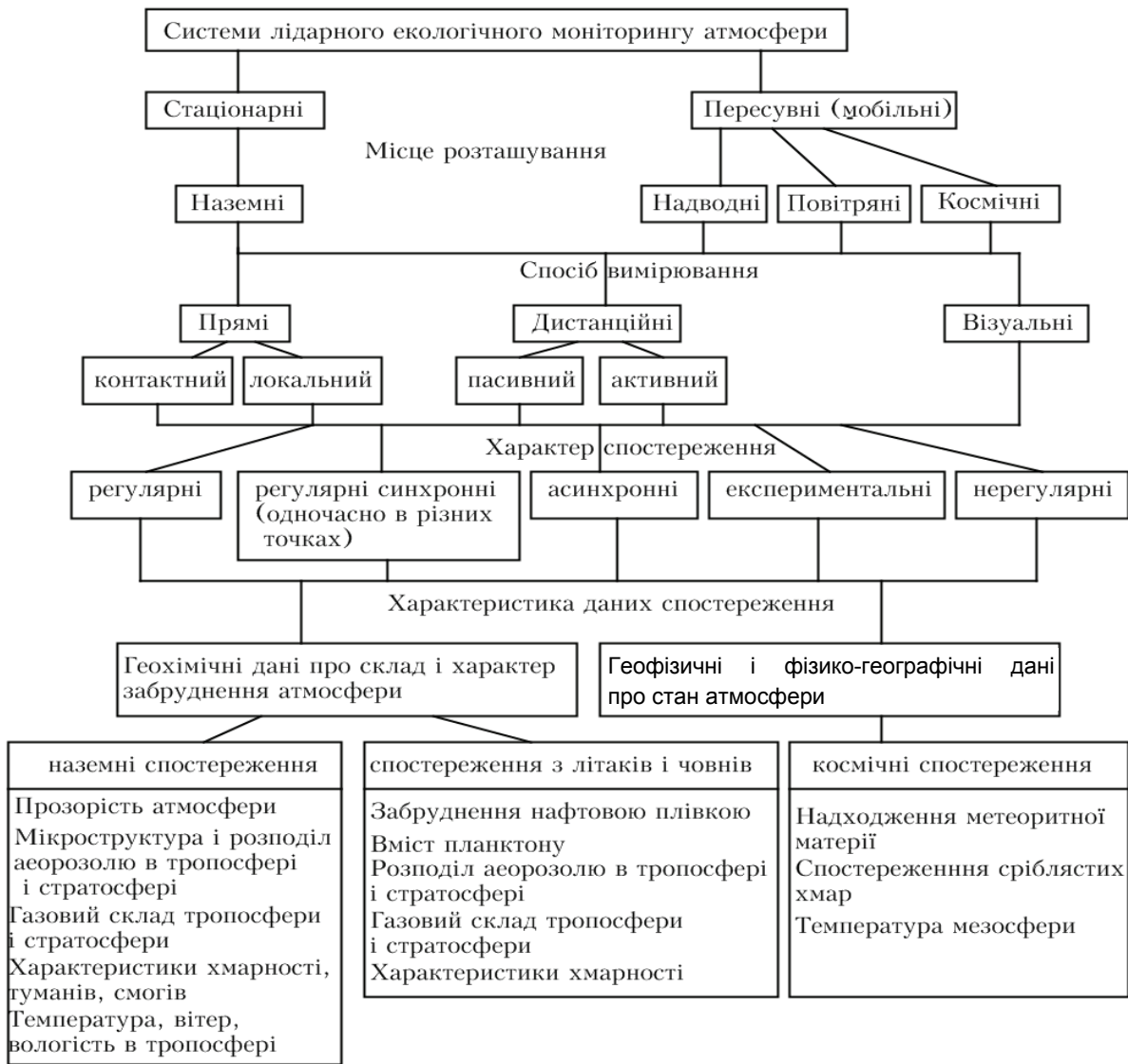


Рис. 1. Схема використання систем лідарного екологічного моніторингу атмосфери

При цьому спектральне пропускання атмосфери дорівнює

$$T(\nu) = \frac{I}{I_0} = \exp(-\alpha l), \tag{2}$$

а спектральне поглинання –

$$A(\nu) = \frac{I - I_0}{I_0} = 1 - \exp(-\alpha l) \lim_{x \rightarrow \infty} . \tag{3}$$

Для лазерного зондування атмосфери необхідно, щоб довжина хвилі випромінювання лазера відповідала спектральному вікну прозорості атмосфери. Розсіювання оптичних хвиль поділяється на три види: розсіювання Мі, релєївське і комбінаційне. Хоча інтенсивність спонтанного комбінаційного розсіювання (СКР) на два-три порядки менша інтенсивності релєєвського розсіювання, використання цього явища перспективне для дистанційної діагностики атмосфери, оскільки інтерпретація даних лазерного зондування в цьому випадку суттєво спрощується. Ефективність розсіювання оптичного випромінювання на окремі частинці аерозолію залежить від її відносного розміру порівняно з довжиною хвилі  $\lambda$ . Якщо  $\rho > 1$ , то спостерігається розсіювання Мі, а якщо  $\rho < 0,3 \dots 0,5$  – релєївське розсіювання. Для існування релєївського розсіювання необхідно одночасне виконання двох умов:

$$\rho \ll 1 \quad \text{і} \quad |m\rho \ll 1, \tag{4}$$

де  $m$  — комплексний показник заломлення в речовині частинки.

Фізично це означає, що фазовий зсув між зовнішнім полем, яке опромінює частинку, і внутрішнім повинен бути дуже малим. Лінійні розміри частинок аерозолі в атмосфері перебувають у діапазоні  $10^{-3} \dots 10^4$  мкм. Тому в загальному вигляді розрахунки взаємодії випромінювання з аерозолем варто проводити з використанням теорії Мі. Слід зазначити, що для розсіювання випромінювання з довжинами хвиль оптичного діапазону на молекулах повітря (поза резонансами) справедливі умови (4), тобто теорія Релея. Теорія молекулярного розсіювання світла Кабанна-Релея дозволяє записати рівняння для розрахунку коефіцієнта об'ємного розсіювання в газах [2, 3]

$$\sigma_R(\lambda) = \frac{8\pi^3(m_c^2 - 1)}{3N\lambda^4} \cdot \frac{6 + 3\Delta}{6 - 7\Delta}, \quad (5)$$

де  $N$  — число молекул в одиниці об'єму;  $m_c$  — показник заломлення середовища;  $\lambda$  — довжина хвилі випромінювання;  $\Delta$  — фактор деполаризації розсіяного випромінювання (для молекул повітря  $\Delta = 0,035$ ).

Величина  $(m_c^2 - 1)$  у чисельнику і  $\sigma_R(\lambda)$  пропорційні концентрації молекул  $N$  або густині повітря  $\rho_n$ . Якщо відоме значення  $\sigma_R(X)$  на якійсь одній довжині хвилі  $\lambda_0$  за нормальних умов в атмосфері ( $P = P_0$ ,  $T = T_0$ ), то для інших значень  $P$  и  $T$  коефіцієнт  $\sigma_R(X)$  визначається за допомогою рівняння

$$\sigma_R(\lambda) = \sigma_{R0}(\lambda_0) \frac{P}{P_0} \frac{T_0}{T} \left( \frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^4. \quad (6)$$

Нормована матриця молекулярного релєвського розсіювання для непоглинаючих газів має вигляд [2, 3]

$$f(y) = \frac{3}{4 + 3\Delta} \begin{vmatrix} 1 + \cos^2 \gamma + \Delta & -\sin^2 \gamma & 0 & 0 \\ -\sin^2 \gamma & 1 + \cos^2 \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \cos \gamma \end{vmatrix}. \quad (7)$$

Індикатриса молекулярного розсіювання, яка описується виразом

$$\aleph(\gamma) = f_{11}(\gamma) = \frac{3}{4} (1 + \cos^2 \gamma) \quad (8)$$

симетрична площині та перпендикулярна напрямку зондувального світлового променя. Коефіцієнти загального  $\sigma_R(\lambda)$  і зворотного  $\sigma_{R,\pi}(\lambda)$  молекулярного розсіювання пов'язані співвідношенням

$$\sigma_{R,\pi}(\lambda) = 0,119\sigma_R(\lambda). \quad (9)$$

Для лазерного зондування вимірюється інтенсивність випромінювання, розсіяного у зворотному напрямку. Тому вираз (9) використовується для визначення  $\sigma_R(X)$  за вимірним значенням  $\sigma_{R,\pi}(\lambda)$  у випадку дистанційного зондування атмосферного повітря [1, 4].

Згідно з теорією розсіювання електромагнітних хвиль на аерозольних частинках, формула для розрахунку об'ємного коефіцієнта розсіювання для заданої довжини хвилі має вигляд [3]

$$\sigma_a(\lambda) = N_a \int_0^\infty \pi a^2 K_p(a, m, \lambda) f(a) da, \quad (10)$$

де  $N_a$  — число частинок в одиниці об'єму;  $K_p(a, m, \lambda)$  — фактор ефективності розсіювання випромінювання на частинках радіусом  $a$ , який залежить від довжини хвилі, розміру частинки і її показника заломлення;  $f(a)$  — функція розподілу аерозольних частинок по розмірах.

## Прозорість атмосфери в чистих і забруднених районах Білорусі

Для дослідження світлового режиму в атмосфері, процесів, що в ній відбуваються, корекції аерокосмічних знімків важливо знати прозорість середовища, що визначається показником послаблення  $\epsilon$ . На підставі експериментальних досліджень розроблені оптичні моделі атмосфери для різних регіонів. Однак, через різні причини, завжди можна очікувати для конкретного району відмінність його оптичних характеристик від модельних. З цією метою за допомогою лідарних систем вивчалися вертикальні профілі показника аерозольного послаблення  $\epsilon_a$  і порівнювалися з модельними профілями, розробленими Міжнародною робочою групою з радіації [1].

Вимірювання здійснювалися в найменш забрудненому промисловими викидами районі — в фоновій станції в Березинском заповіднику (район I) і в лісовому районі в 30 км від м. Мінська (район II). У першому випадку аналізувався масив з 35 профілів показників послаблення, кожний з яких є результатом усереднення даних за декілька годин спостереження у вечірній, нічний і ранковий час. У другому випадку масив складався з 30 профілів, додатковим критерієм вибору для яких був напрямок вітру убік міста. Одночасний контроль метеорологічних параметрів атмосфери і аерозольної компоненти дозволив зробити висновок, що відібраний масив даних був отриманий в умовах відсутності безпосереднього впливу індустриальних викидів на склад атмосфери. Розподіли середніх значень висотних профілів аерозольного показника послаблення на довжині хвилі 694 нм для двох зазначених вище районів подані на рис. 2.

У приземному шарі в ряді випадків спостерігалось формування оптично густішого атмосферного серпанку. Профілі  $\epsilon_a(h)$  для обох районів близькі за основними параметрами: оптична товщина 0,16 і 0,20; верхня границя шару, в якому значення показника послаблення повільно змінюються, перебуває на висоті 1,6 і 2,0 км відповідно. Зіставлення отриманих результатів з різними варіантами оптичних моделей показало, що механізми формування профілів аерозольних характеристик у шарі активного турбулентного обміну цілком пояснюють результати вимірювань. Наведені вище кількісні характеристики аерозольного шару узгоджуються з варіантом CONT-1 тропосферної моделі SRA-84 [1] (крива 3, рис. 2).

Зовсім інший характер спектральних і висотних залежностей показника аерозольного послаблення поблизу промислових районів. На рис. 3а для висоти близько 200 м подані спектри показника аерозольного послаблення (що збігаються тут зі спектром показника розсіювання), отримані спостереження лідарним методом протягом декількох днів поблизу м. Солігорська. При цьому структура спектра щораз змінювалась, що свідчило про мінливість аерозольних часток, породжених у промисловій зоні міста напередодні. Висотний профіль показника послаблення поблизу промислових зон також різко змінюється за часом і висотою. На рис. 3б поданий один з таких профілів на довжині хвилі  $\lambda = 694$  нм. Спектри  $\sigma_a$  на трьох висотах (рис. 3в) відмінні один від одного.

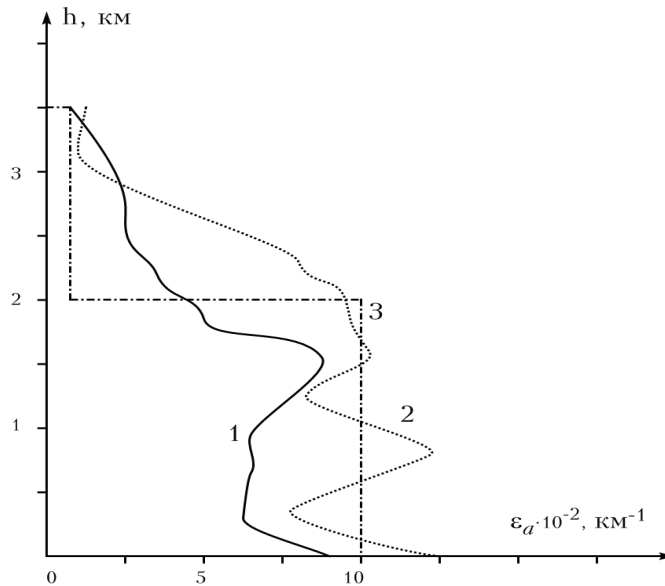


Рис. 2. Профілі середнього значення показника аерозольного послаблення для  $\lambda = 694$  нм для районів I(1), II(2) і тропосферної моделі CONT 1(3)

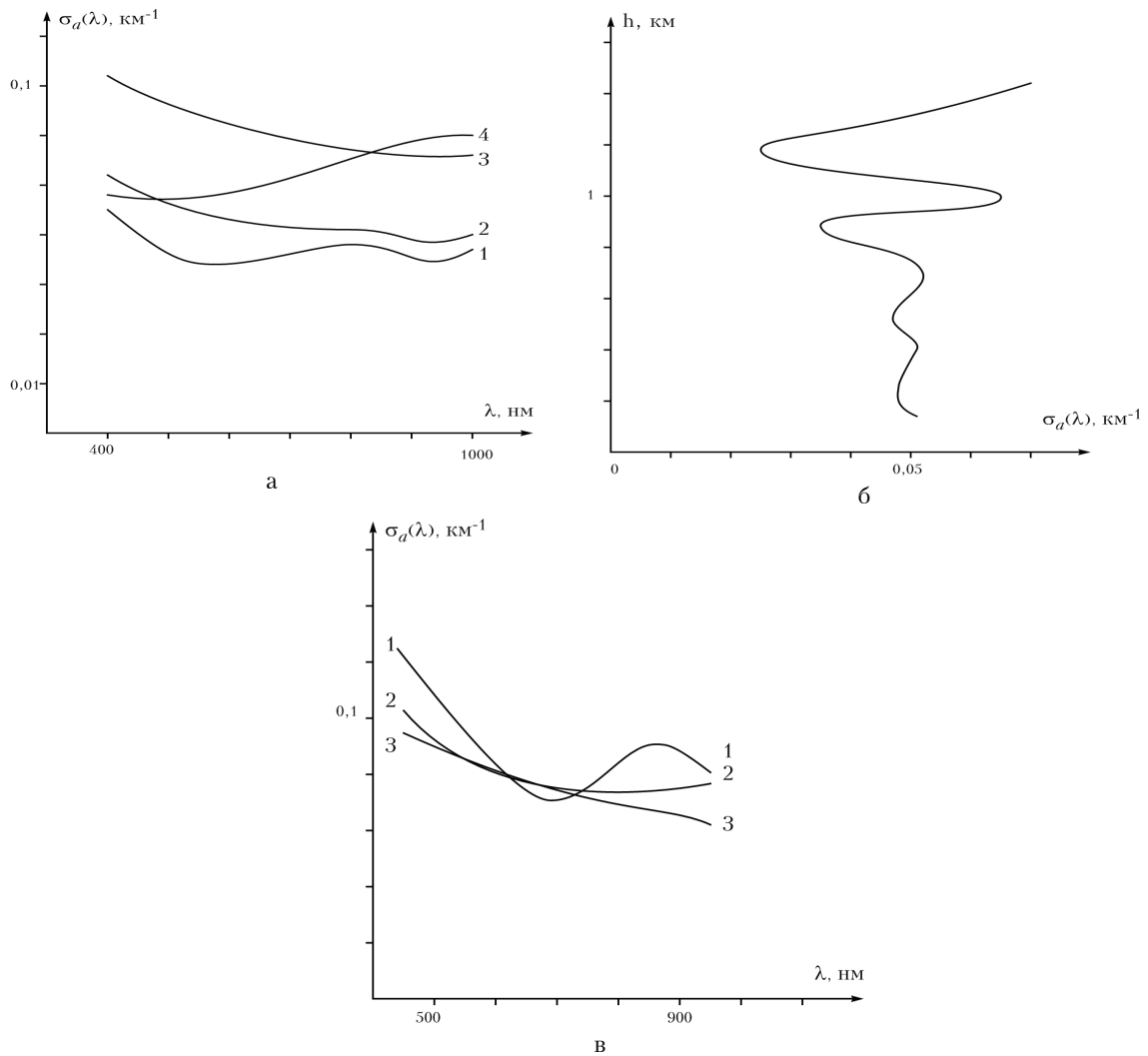


Рис. 3. Показник аерозольного послаблення у промисловому районі: а) спектри показника аерозольного послаблення у чотири (1–4) різні дні спостережень; б) вертикальний профіль показника аерозольного послаблення при  $\lambda = 694$  нм; в) спектри показника аерозольного послаблення на різній висоті, км: 1 – 0,32; 2 – 0,68; 3 – 1,1.

### Аналіз структури атмосферного аерозолі

Спектральні оптичні характеристики можна використовувати для оцінки структури аерозолі. Метод лінійних оцінок [2, 3] дозволяє під час вимірювання вертикальних профілів показників зворотного розсіювання  $\beta_a(h, \lambda)$  на двох довжинах хвиль визначити: профілі об'ємної концентрації  $C_v$ , середній переріз  $C_s$ , середній об'ємно-поверхневий радіус  $r_{32}$ . На рис. 4 зображені усереднені дані з багатьох реалізацій, визначені шляхом проведення лідарного зондування на  $\lambda = 1,06$  і  $0,53$  мкм.

Під час роботи на багатьох довжинах хвиль (порядку 6–7) можна відновити функцію розподілу

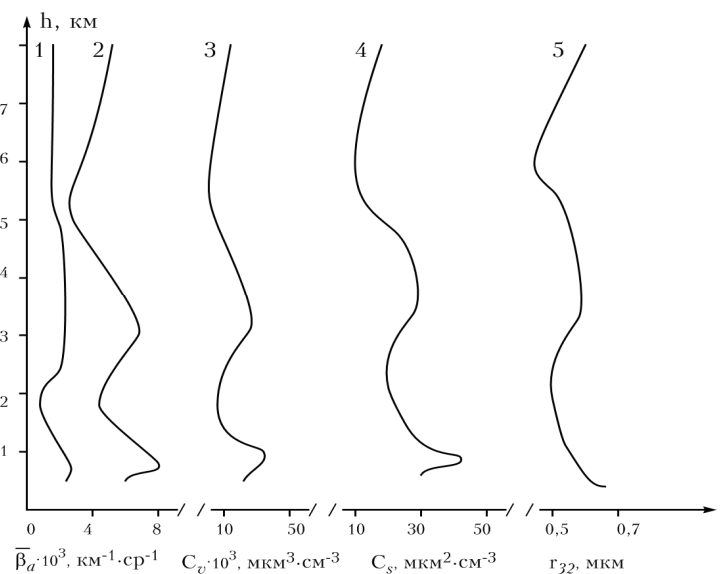


Рис. 4. Профілі оптичних і мікрофізичних параметрів аерозолі: 1 –  $\lambda = 1,06$  мкм; 2 –  $\lambda = 0,532$  мкм; 3 –  $C_v$ ; 4 –  $C_s$ ; 5 –  $r_{32}$

часток за розмірами  $\phi(r, h)$ , що ґрунтується на розв'язку інтегрального рівняння

$$\beta_a(h, \lambda) = \int k_\pi(r, m, \lambda) \pi r^2 \phi(r, h) dr, \tag{11}$$

де  $\beta_a(h, \lambda)$  — показник зворотного аерозольного розсіювання на висоті  $h$  для випромінювання з довжиною хвилі  $\lambda$ ;  $k_\pi(r, m, \lambda)$  — фактор ефективності зворотного розсіювання сферичної частинки радіуса  $r$  з комплексним показником заломлення  $m$ .

Як приклад, на рис. 5 наведені розраховані  $\phi(r)$  на різній висоті. Результати аналізу показників  $\beta_a(\lambda_i)$  свідчать про те, що багатохвильове зондування є ефективним засобом вивчення просторово-часової мінливості функцій розподілу частинок аерозолю за розмірами. Відновлені функції  $\phi(r)$  у кількісному і якісному вигляді добре узгоджуються з результатами прямих (контактних) мікрофізичних досліджень атмосферного аерозолю. Вимірювання сигналів зворотного розсіювання дозволяє визначати не тільки структуру, але й масову концентрацію аерозолю  $M$  за допомогою співвідношення

$$M = \mu(\lambda_i) \beta_a(\lambda_i), \tag{12}$$

де  $\beta_a(\lambda_i)$  — показник зворотного розсіювання на  $i$ -й довжині хвилі,  $\mu(\lambda_i)$  — коефіцієнт, визначений за результатами калібрування на основі відбору проб аерозолю.

Похибка оцінки масової концентрації цим методом у короткострокових пробах не перевищує 5 %.

### Вирішення проблеми міжрегіонального переносу компонентів атмосфери

Дотепер йшла мова про стан і властивості нижніх шарів атмосфери, які визначаються погодними, кліматичними і антропогенними особливостями конкретного невеликого регіону. Зміни стану верхньої тропосфери і стратосфери відбуваються внаслідок великомасштабних природних катастроф і антропогенних впливів на навколишнє середовище. Вітрове перенесення повітряних мас призводить до поширення забруднюючих викидів на тисячі кілометрів. Проблема міжрегіонального переносу компонентів атмосфери, набуває щораз більшого значення у світлі посилення уваги держав до питань екологічної безпеки. Завдання виявлення і оцінки потужності джерел викидів, їх складу, визначення траєкторій переносу забруднень вийшли з області чисто наукових інтересів і починають набувати все більшого значення з економічної і політичної точок зору. Глобальний контроль навколишнього середовища не може бути вирішений у рамках однієї держави. З одного боку, через те, що потрібні значні інтелектуальні і матеріальні ресурси, з іншого боку — необхідні узгоджені зусилля щонайменше держав цілого регіону або континенту. Ще в середині 90-х років країни ЄС приступили до систематичного вирішення проблеми контролю забруднення атмосфери в регіоні Європи шляхом створення спочатку національних, а потім і Європейської мережі лідарних станцій.

Інститут фізики НАН Біларусі у рамках п'ятої Європейської рамкової програми залучений до проекту «Європейська лідарна мережа для дослідження впливу аерозолю на клімат», у якому беруть участь 15 країн Європи з 28 лідарними станціями. Інформація про виникнення надзвичайних ситуацій та обмін даними поширюється між станціями Єв-

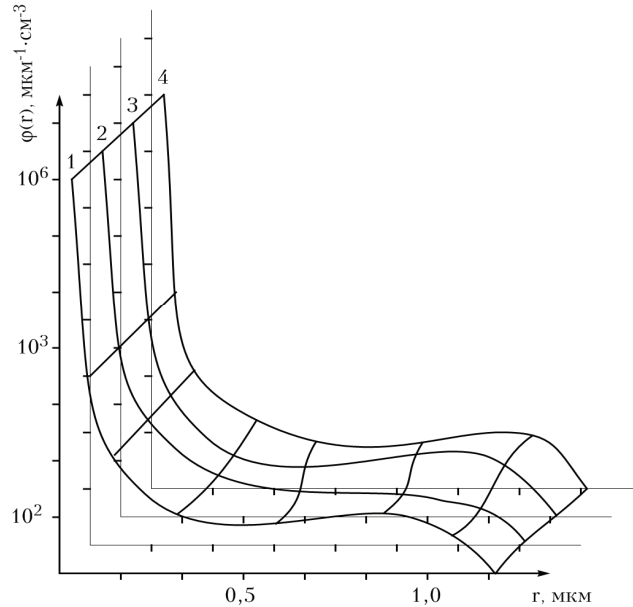


Рис. 5. Функції розподілу частинок за розмірами на різній висоті в період антициклону: 1 — 220 м; 2 — 230 м; 3 — 260 м; 4 — 300 м

ропейської мережі EARLINET за допомогою Інтернету. В даний час Інститут фізики НАН Білорусі проробляє питання про створення лідарної мережі країн СНД, що включає лідарні центри в Білорусі (м. Мінськ), Росії (міста Москва, Томськ, Сургут, Владивосток і судна Далекосхідного наукового центру РАН), Киргизії (район озера Іссик-Куль) та ін. На території України, також ведуться ініціативні роботи зі створення лідарної станції з центром у м. Вінниці за участю Національного космічного агентства України, КНУ ім. Т. Г. Шевченка та ВНТУ. В результаті планується здійснити зв'язування Європейської, Східно-азіатської (Японія, Південна Корея, Китай) лідарних мереж і мереж країн СНД.

### Висновки

Моніторинг забруднення атмосфери принципово неможливо здійснити тільки класичними методами, які подають інформацію з невеликого числа станцій і, як правило, у приземному шарі. В основі отримання відомостей про склад повітря лідарною технікою лежать найсучасніші методи спектроскопії, математичної обробки інформації та знання будови атмосфери. Загальну картину просторового забруднення необхідно отримувати дистанційним (лідарним) способом і в окремих реперних точках підтверджувати або корегувати і уточнювати отриману карту забруднення загальноприйнятими тестованими приладами. Така позиція світового співтовариства на нинішньому етапі розвитку систем глобального екологічного моніторингу атмосфери.

Роботу виконано за сприяння Державного фонду фундаментальних досліджень Міністерства освіти і науки України відповідно спільному україно-білоруському проекту.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. A preliminary cloudless standard atmosphere for radiation computation. International Association for Meteorology and Atmospheric Physics. Radiation Commission. Boulder, Colorado, USA, 1984, 53 p.
2. Лидарные системы и их оптико-электронные элементы / [Ю. М. Андреев, В. Г. Воеводин, П. П. Гейко и др.] ; под общей ред. чл.-кор. РАН М. В. Кабанова. — Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2004. — 526 с.
3. Чайковский А. П. Исследование структуры атмосферного аэрозоля методом спектрально-поляризационного лазерного зондирования. Рассеяние и поглощение света в природных и искусственных средах / А. П. Чайковский. — Минск : Институт физики АН БССР им. Б. И. Степанова, 1991. 431 с.
4. Иванов А. П. Лазерный луч исследует атмосферу / А. П. Иванов, А. П. Чайковский : печатается по решению РИСО ИФ НАН Беларуси. — Минск : Институт физики НАНБ, 2002.

Рекомендована кафедрою екології та екологічної безпеки

Надійшла до редакції 4.11.09  
Рекомендована до друку 26.11.09

**Іванов Аркадій Петрович** — завідувач лабораторії, **Чайковський Анатолій Павлович** — головний науковий співробітник.

Лабораторія оптики розсіювальних середовищ, Інститут фізики ім. Степанова НАН Білорусі, м. Мінськ;

**Васильківський Ігор Володимирович** — доцент, **Петрук Василь Григорович** — завідувач кафедри, **Кватернюк Сергій Михайлович** — науковий співробітник.

Кафедра екології та екологічної безпеки, Вінницький національний технічний університет