

ПЕРСПЕКТИВИ ПАСИВНОЇ ДИСТАНЦІЙНОЇ СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТРІЇ АТМОСФЕРНОГО АЕРОЗОЛЮ

Ж. І. Патлашенко

Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління
вул. В. Липківського, 35, корп. 2, 03035, м. Київ, Україна. E-mail: deazh@ukr.net.

Розглянуто основи і перспективи дистанційної спектрополяриметрії атмосферного аерозолю, визначено основні екологічні проблеми, які пов'язані з аерозольним забрудненням атмосфери, розглянуто основні закономірності розсіяння світла атмосферним аерозолем, насамперед, його вплив на поляризацію обернено розсіяного сонячного випромінювання. Основну увагу приділено спектральній і фазовій залежності параметрів Стокса для випромінювання розсіяного на аерозольних частинках від їх характеристик з точки зору пасивного (портативні малогабаритні спектрополяриметри) і активного (лідарні системи із спектрополяриметричною рес-трацією обернено розсіяного світла) дистанційного екологічного моніторингу. Дисперсія другого і четвертого параметрів Стокса несуть інформацію про функцію розподілу частинок за розмірами і показник заломлення частинок, а, при деяких умовах, також і показник поглинання. Встановлення компактних малогабаритних спектрополяриметрів, здатних вимірювати спектральну дисперсію двох - чотирьох параметрів Стокса, на моніторингові супутники Землі дозволить ефективно досліджувати основні характеристики аерозольної складової атмосфери Землі.

Ключові слова: спектрополяриметрія, Стокс-поляриметрія, аерозоль, екологія, атмосфера.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПАССИВНОЙ ДИСТАНЦИОННОЙ СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТРИИ АТМОСФЕРНОГО АЕРОЗОЛЯ

Ж. И. Патлашенко

Государственная экологическая академия последипломного образования и управления
ул. В. Лыпкивского, 35, корп. 2, 03035, г. Киев, Украина. E-mail: deazh@ukr.net.

Рассмотрены основы и перспективы дистанционной спектрополяриметрии атмосферного аэрозоля, определены основные экологические проблемы, возникающие из-за аэрозольного загрязнения атмосферы, рассмотрены основные закономерности рассеяния света атмосферным аэрозолем, в первую очередь, его влияние на поляризацию обратно рассеянного солнечного излучения. Главное внимание уделено спектральным и фазовым зависимостям параметров Стокса для излучения рассеянного на аэрозольных частичках от их характеристик с точки зрения пассивного (портативные малогабаритные спектрополяриметры) и активного (лидарные системы со спектрополяриметрической регистрацией обратно рассеянного света) дистанционного экологического мониторинга. Второй и четвёртый параметры Стокса несут информацию про функцию распределения частиц по размерам и показатель преломления частиц, а при некоторых условиях, также и показатель поглощения. Таким образом, установка компактных малогабаритных спектрополяриметров, способных измерять спектральную дисперсию от двух до четырёх параметров Стокса, на мониторинговые спутники позволит эффективно исследовать основные характеристики аэрозольной составляющей атмосферы Земли.

Ключевые слова: спектрополяриметрия, Стокс-поляриметрия, аэрозоль, экология, атмосфера.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Розсіяння світла атмосферою Землі є досить складним процесом, який залежить від концентрації та стану різних компонент атмосфери, а також від зовнішніх параметрів, насамперед, температури та тиску.

Атмосферний аерозоль - невід'ємна складова атмосфери, що має потужний вплив на її екологічні та кліматичні параметри. Маленькі частинки аерозолю розміром від одиниць нанометрів до мікрометру часто мають складний хімічний склад і агрегатний стан [1–2]. Різноманітність внутрішньої структури і фізико-хімічних властивостей аерозольних частинок ускладнює їх дослідження. Однак, не зважаючи на складність структури і комплексність взаємодії аерозольних частинок із квантами світла, атмосферний аерозоль в нормальних умовах відносно добре піддається регіонально-сезонному моделюванню. Саме такі моделі і використовуються як основа для дистанційних оптичних методів дослідження.

Однак, у випадку нерегулярних природних або техногенних аерозольних викидів в атмосферу Землі, таких як виверження вулканів, урагани, піщані бурі, антропогенні точкові та площинні джерела

забруднення, тощо, більша частина сучасних моделей атмосферного аерозолю не дозволяє отримати необхідної якості вимірювальних даних, обмежуючись неінформативною величиною узагальненої оптичної щільності аерозолів. Дана проблема стає особливо актуальною у масштабах глобального моніторингу, коли моніторингові дані інтерпретуються на основі великомасштабних атмосферних моделей і не враховують локальні особливості.

Мета даної роботи полягає у аналізі сучасних підходів і перспектив глобального дистанційного моніторингу атмосферного аерозолю.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ. Аерозольна складова атмосфери формується природним і антропогенним шляхом. Природний шлях формування аерозолів включає в себе увесь спектр природних фізико-хімічних явищ, таких як випаровування і конденсація, турбулентні газо- і гідродинамічні процеси, фотохімічні та хімічні реакції, тощо [3]. Аерозоль також формується в результаті антропогенної діяльності, в результаті спалювання нафтопродуктів, вугілля, газу, тощо, індустриального виробництва хімічної, видобувної,

будівельної промисловості, аграрної діяльності і іншого. Ще одним джерелом аерозолів є вітровий підйом пилу в наслідок ерозії ґрунту, який також містить в собі речовини природного та/або антропогенного походження.

Найбільшу частину атмосферних аерозолів складає морський аерозоль. А сумарна кількість антропогенного аерозолу в атмосфері оцінюється у 10 % від його загальної маси.

Атмосферний аерозоль впливає на глобальний клімат, змінюючи кількість сонячної радіації, що досягає підстилаючої поверхні Землі, а також на прозорість атмосфери в інфрачервоному діапазоні випромінювання Землі. Ці явища зумовлені низкою прямих та непрямих аерозольних ефектів. Існує ще поняття частково-прямого аерозольного ефекту [4–5].

Прямий аерозольний ефект полягає у поглинанні і розсіянні випромінювання атмосферним аерозолем. Непрямий - у зміні альbedo підстилаючої поверхні Землі через вплив атмосферного аерозолу на оптико-фізичні та інші параметри хмар. Стаючи ядром конденсації аерозоль збільшує кількість краплинок (перший непрямий аерозольний ефект Тумєя [6–7]) і зменшує їх об'єм, затримуючи випадіння дощу, тобто продовжує час життя хмар (другий непрямий аерозольний ефект Альбрехта [5–7]).

Частково-прямий аерозольний ефект включає усі ефекти, що не відносяться до прямого і непрямих аерозольних ефектів, таких, як висотний перерозподіл вологості [8], стабілізація вертикальних потоків вологості [9], зміна вертикального розподілу температури [5], тощо.

Важливим кліматичним і екологічним явищем також є осадження атмосферного аерозолу, внаслідок якого змінюється альbedo підстилаючої поверхні Землі. Яскравим прикладом такого явища є осадження антропогенного аерозолу в Арктиці, що є одним із факторів зменшення площі Арктичних льодовиків через зниження альbedo Арктичної криги.

Окрім кліматичного ефекту аерозоль також прямим чином впливає на об'єкти біосфери і, в решті решт, прямо чи опосередковано на людину. З 1970-х років багато смертельних випадків стабільно пов'язують із антропогенним аерозольним забрудненням атмосфери [10–11], зокрема щорічна кількість таких смертельних випадків у США оцінюється від 22 000 до 52 000 осіб [12]. А загальна кількість респіраторних захворювань за різними оцінками збільшується на 50% за кожні 5 років [13].

Добре вивчено, що внаслідок вдихання маленьких частинок аерозолу може виникати астма, рак легенів, кардіоваскулярні проблеми, респіраторні захворювання, дефекти народження і передчасна смерть.

Великі аерозольні частинки в основному фільтруються носоглоткою. Але частинки, розміром менше 10 мкм можуть потрапляти у найглибші ділянки легенів - у бронхи та у альвеоли і у Європейських країнах регулюються екологічним показником PM10.

Частинки розміром менше 2,5 мкм регламентуються екологічним стандартом PM2,5 і можуть потрапляти у газообмінні частини легенів призводячи до формування бляшок у артеріях, спричиняючи

запалення судин, артеріосклероз та інші серцево-судинні захворювання [14]. Згідно оцінок Всесвітньої організації охорони здоров'я частинки класу PM2,5 спричиняють 3% смертельних випадків від кардіопульманальних захворювань, 5% смертельних випадків від раку трахеї, бронхів і легенях, і до 1% смертельних випадків від гострої респіраторної інфекції у дітей до 5 років [10]. Причому, такі ефекти можуть виникати навіть при короткочасному вдиханні відповідних аерозольних частинок [15].

Аерозольні частинки розмірами порядку 100 нм і менше, до яких належать вихлопи сучасних «чистих» дизельних двигунів, вільно потрапляють через легені у кров і прямим чином вражають інші внутрішні органи, навіть мозок. Цей аерозоль може нести канцерогенні компоненти, наприклад, бензопирени.

Проникна здатність частинок аерозолу залежить в органах людини визначається не лише їх розміром, а і їхньою формою та їх фізико-хімічним складом.

Питання залежності екологічної небезпеки аерозольного забруднення атмосфери від форми аерозолу є мало вивченим. Сформульовані лише загальні твердження про те, що частинки аерозолу із «гострими елементами форми» (наприклад, азбест) є більш небезпечним, ніж частинки аерозолу з гладенькою поверхнею. Нанорозмірні частинки аерозолу, які мають збільшену у порівнянні зі сферою площу поверхні, мають і більше шансів акумулювати на власній поверхні різні небезпечні речовини.

Потрібно зробити зауваження, що буде некоректним оцінювати загальну масу аерозольного забруднення атмосфери в якості екологічних характеристик або стандартів, тому що частинка розміром 10 мкм екологічно значно безпечніша для біосфери і, зокрема, здоров'я людини, ніж 1000 частинок по 100 нанометрів, які мають в 100 раз меншу сукупну масу. В деяких країнах вводяться нові пропозиції - разом із масою аерозолу, регулювати сукупну площу поверхні аерозолів у складі аерозольних викидів.

Іще одним джерелом екологічної небезпеки антропогенного і природного аерозольного забруднення є опосередкований вплив на людину через продукти харчування тваринного і рослинного походження, а також через порушення природних екосистем. Так, висока концентрація атмосферних аерозолів може призводити до значно підвищеної смертності в деяких рослинах.

Крім того, аерозоль може бути напряму шкідливою для здоров'я живих організмів, наприклад сильно токсичний аерозоль або бактерії і віруси. Зокрема, не можна обходити стороною все більш актуальну після аварій на Чорнобильській АЕС та АЕС Фукусіма-1 екологічну проблему вкрай небезпечного радіоактивного атмосферного аерозолу, що в основному представлений частинками розміром від 0,02 до 1 мкм. Радіоактивні аерозолі умовно поділяють на «малоактивні» (активність частинки менше 10^{-13} Ки), «напів-гарячі» (активність від 10^{-13} до 10^{-10} Ки) і «гарячі» (більше 10^{-10} Ки), а за джерелом - на природні, вибухові, що формуються в результаті ядерних випробувань і промислові, які виникають в результаті різних видів діяльності, пов'язаної із поводженням із радіоактивними речовинами.

Радіоактивний аерозоль є значно шкідливішим для живих організмів, аніж еквівалентне зовнішнє опромінення, оскільки можуть проникати всередину організму, створюючи внутрішнє опромінення, безпосередньо впливаючи на внутрішні органи через очагову некротизацію клітин, і лише 10–50% з нього може ефективно вилучатися з організму. Середній час перебування радіоактивного аерозолу у тропосфері змінюється від 2 до 30 діб в залежності від метеорологічних і локальних атмосферних особливостей і може швидко розноситися по усій Земній кулі.

Усвідомлюючи екологічну небезпеку природних і антропогенних аерозолів окремі країни і світова спільнота прикладають чималих зусиль для проведення постійного моніторингу аерозольного стану атмосфери, особливо під час надзвичайних ситуацій техногенного чи природного характеру. Усі методи спостереження аерозольної складової атмосфери досить чітко розділяються на два класи: контактні і дистанційні спостереження.

Локальні спостереження проводяться поблизу забруднюючих об'єктів [16], по периметру площинних джерел аерозольного забруднення [17] і поблизу великих населених пунктів чи зон особливого екологічного контролю.

Контактні методи в спеціальних гідрометеорологічних лабораторіях полягають у аналізі хімічного складу атмосферних осадів або проб атмосферного повітря і включають у себе аерозольну мас-спектрометрію, диференціальний аналіз рухливості, аеродинамічна частинкова сепарація, аерозольна спектрометрія, відбір проб за допомогою імпактора, лічильник конденсованих частинок, епіфанометр, електронно-мікроскопічні дослідження, інструментальний нейтронно-активаційний аналіз, тощо. З одного боку, контактні методи є найбільш точними і достовірними методами дослідження екологічного стану атмосферного аерозолу, що робить їх основою для міжнародного і національних законодавств, однак з іншого боку вони є вкрай обмежені просторово.

Група безконтактних дистанційних методів має менший рівень точності і достовірності порівняно із лабораторними методами, однак дозволяє за умови порівняно невеликої вартості дослідних робіт визначати базові параметри аерозольного стану атмосфери. Класичні методи дистанційного моніторингу включають в себе сонячні фотометри, поляриметри і лідари, які дозволяють визначити оптичну густину аерозолів і, в деяких випадках, зробити висновки про положення максимуму функції розподілу аерозолів за розмірами.

Дистанційні методи дослідження можуть бути активними і пасивними. До активних методів відноситься, зокрема, лідарне дослідження атмосфери, що спостерігає розсіяння атмосферою лазерного випромінювання. Очевидно, такий метод вимагає використання досить складної інфраструктури для живлення потужного лазера, але дає можливість будувати вертикальний розподіл досліджуваної компоненти атмосфери і не залежить від часу доби.

Серед активних методів також варто виділити непрямі методи дослідження, які дозволяють

проводити моніторинг впливу конкретного типу атмосферного аерозолу на інші компоненти атмосфери чи підстилаючої поверхні. Яскравим прикладом таких методів є фіксація іонізації повітря радіоактивними аерозолями за допомогою радарів, що дозволяє кількісно відстежувати його емісію і перенос за допомогою готових серійних радіолокаторів – військових, авіаційних, тощо.

Пасивні методи полягають у дослідженні розсіяної земною атмосферою сонячної радіації. Відповідно в такі методи вноситься додаткова неоднозначність у зв'язку зі зміною параметрів сонячного випромінювання із часом, а також обмеження, пов'язані із необхідністю витримки з певною точністю сонячного кута, обмежуючи час спостереження окремих ділянок неба і привносячи додаткові неточності через більш суттєвий ніж для лідарних досліджень вплив інших компонент атмосфери через перерозсіяння, люмінесценцію, перепоглинання сонячного випромінювання, тощо.

Частково ці проблеми вирішуються прямим градуванням по сонцю, що особливо ефективно поза атмосферою Землі, а також використанням багаточастотної спектрометрії або спектрофотометрії, що також дозволяє досліджувати більшу кількість параметрів атмосфери.

Дистанційні методи використовуються як у наземному базуванні, так і у аерокосмічному. Виходячи зі підвищеної складності і неоднозначності інтерпретації космічних даних, наземні станції, які охоплюють спостереженнями досить обмежений об'єм атмосфери, використовуються найчастіше як підсупутникові валідаційні станції для глобального супутникового моніторингу.

Таким чином сучасний стан розвитку методів дослідження атмосферного аерозолу не вирішує проблему високоточного глобального моніторингу. Локальні методи не зважаючи на їх точність є вкрай просторово обмеженими для вирішення глобального моніторингу, а дані глобального супутникового моніторингу неточні і обмежені по кількості вимірюваних параметрів.

Загальна риса дистанційних методів полягає у дослідженні інтенсивності однієї чи декількох спектральних смуг. Однак, світлове випромінювання окрім частоти має також і поляризацію.

Таким чином, на сьогодні існує можливість в чотири рази збільшити кількість інформації, що отримується з дистанційних досліджень атмосфери, шляхом спектрополяриметричних дистанційних вимірювань розсіяння лазерного або сонячного випромінювання.

Саме тому метою даної роботи є аналіз перспектив і можливостей сучасної теоретичної бази дистанційної спектрополяриметричної атмосферного аерозолу.

Взаємодія маленьких частинок аерозолу суттєво відрізняється від взаємодії молекул і атомів газів із оптичним випромінюванням. Зокрема це стосується поляризаційних властивостей розсіяного випромінювання.

Матриця розсіяння є квазі-симетрична матриця Мюллера, що складається із 16 компонент, і описує

перетворення вектору Стокса, тобто поляризації, падаючого випромінювання у вектор Стокса відбитого випромінювання. Конкретні значення параметрів матриці розсіяння залежать від усереднених характеристик атмосферного аерозолу і дисперсії його оптичних властивостей, а також від орієнтації анізотропних частинок відносно падаючого випромінювання. У деяких окремих випадках вигляд матриці розсіяння спрощується, зокрема, поява того чи іншого типу симетрії зменшує кількість незалежних компонентів.

Відновлення всіх незалежних компонент матриці розсіяння можливе лише за випадку, якщо існує можливість контролювано змінювати параметри випромінювання, що потрапляє на об'єкт, що досліджується.

Активна Стокс-поляриметрия може бути імплементована у автономних зондах, в атмосфері Землі, однак обмеження такого підходу співпадають із контактними методами дослідження. В дистанційних методах це можливо реалізувати за допомогою лідарів, що має свої інженерно-технічні обмеження, як з точки зору габаритно-масових характеристик, так і з точки великого споживання енергії.

Не дивлячись на те, що використання лідарної техніки дозволяє отримувати не лише узагальнені властивості атмосфери, але й її вертикальну стратифікацію, є певні принципові і технічні обмеження такого підходу, що полягають у наступному. Найперше, поляризація розсіяного назад світла для більшості типів атмосферного аерозолу майже ідентична поляризації світла, що розсіюється, тому подібні дослідження необхідно виконувати синхронною системою із просторово розділених лазерів і приймачів розсіяного світла, що зменшує мобільність і ефективність усієї системи. Можливі схеми синхронних наземно-супутникових досліджень можливо, наприклад, використовувати для валідації даних супутникового моніторингу. Крім того, навіть при наявності обмеженої кількості просторово розділених приймачів, стан поляризації розсіяного випромінювання визначається на дискретному наборі фазових кутів, що не дозволяє ефективно визначити параметри аерозолу шляхом порівняння їх із модельними. І третє, існують певні технічні проблеми для використання потужних лазерів із перестроюваною частотою для активних спектрополяриметричних досліджень атмосферного аерозолу, зокрема застосування у них екологічно-шкідливих органічних барвників.

З іншого боку, пасивні прилади дозволяють зробити їх достатньо компактними для використання на борту космічного апарату. На сьогодні для космічного дистанційного моніторингу атмосфери Землі використовуються спектрометри, здатні вимірювати лише один параметр Стокса, або поляриметри, які можуть вимірювати 2 і більше параметрів Стокса, однак мають дуже широкі спектральні смуги і тому не здатні розділити ефекти, пов'язані із газовою і аерозольною складовою, а також надійно виключити вплив підстилаючої поверхні.

Таким чином, на сьогодні не існує ефективного

методу глобального моніторингу матриці розсіяння атмосферного аерозолу.

Розсіяння світла атмосферним аерозолем в теорії зазвичай розглядається як розсіяння на малих (розмір частинки менше довжини хвилі) і великих аерозольних частинках, які априорі приймаються сферичними. Однак, частинки сферичної форми не спостерігаються у природі і навіть дощова крапля має відмінну від сферичної форму в наслідок дії сили тяжіння і газодинамічних процесів. Значно більші відхилення форми від сферичної для кристалів, сніжинок, частинок диму та пилу, що утворюється в результаті дроблення мінералів, розрахунок елементів матриці розсіяння яких є складною теоретичною задачею. Окремий клас аерозолів складають "шершаві" частинки, неоднорідності на поверхні яких менше і порядку довжини хвилі.

Експериментально було показано, що застосування сферичної моделі атмосферних аерозолів (теорії Мі) не є коректним для хаотично орієнтованих частинок роздробленого скла і в результаті такої інтерпретації отримуються хибні фазові залежності компонентів матриці розсіяння. Також були експериментально знайдені (залежні від температури) фазові розбіжності для ступеня лінійної поляризації кристалічного аміаку, який утворювався в камері при температурі від 130 до 180 °К, у трьох ділянках спектра з ефективними довжинами хвиль 470, 652 і 937 нм.

Основні відмінності розсіяння хаотично орієнтованими несферичними частинками полягають у менш інтенсивних інтерференційних структурах на фазових залежностях ступеня поляризації і на індикатрисі розсіяння, та на зменшеному піку зворотного розсіяння. При цьому залежність величини альбедо однократного розсіяння слабо залежить від особливостей форми частинок [18].

Другий параметр Стокса, його знак і форма індикатрисі розсіяння для великих частинок сильно залежать від показника заломлення і параметрів функції розподілу аерозолу за розмірами. Частота і амплітуда осциляції ступеня поляризації та його знака в залежності від фазового кута, розміру частинки і її показника заломлення великі для монодисперсного аерозолу і менші для полідисперсного. Крім того, піки прямого та зворотного розсіяння збільшуються зі збільшенням дисперсії розмірів, при цьому пік зворотного розсіяння також прямо пропорційний показнику заломлення.

Варто звернути увагу, що розмір аерозолу визначається однозначно лише для сферичних частинок. Для несферичних частинок вводять поняття "еквівалентного" радіусу - тобто радіусу сфери ідентичного об'єму, а також "коефіцієнту сферичності", як відношення поверхонь частинки і сфери еквівалентного радіусу. Іноді з практичних міркувань використовують "седиментаційний" або "стоксовий" радіус, тобто радіус сфери, яка має ідентичну стоксову швидкість осідання несферичної частинки.

Одним із найперспективніших дистанційних методів визначення спектральної залежності показника заломлення є вимірювання та аналіз

залежності значень другого параметра Стокса від фазового кута розсіяного аерозолем випромінювання (рис. 1), а у разі обмеженості інтервалу фазових кутів - його дисперсію.

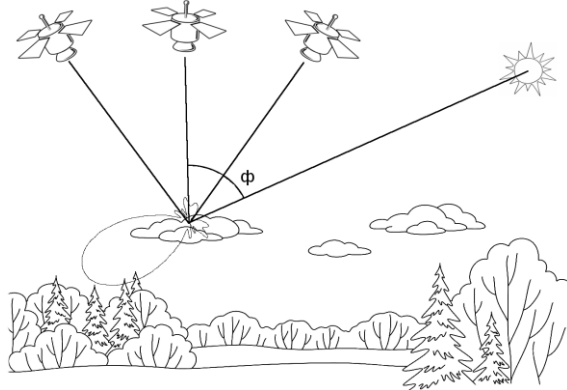


Рисунок 1 – Геометрія космічного моніторингу атмосферного аерозолу, ϕ - фазовий кут спостереження, тобто кут між променем світла, що падає від Сонця на досліджуваній об'єм атмосфері і променем, що відбився від неї у напрямку спостерігача

Виходячи з того, що другий параметр Стокса несе інформацію про верхні шари атмосфері [18], можна знехтувати її вертикальною неоднорідністю і вертикальною стратифікацією параметрів функції розподілу частинок за розмірами. Крім того, на оцінку показника заломлення слабо впливають похибки модельної функції розподілу частинок за розмірами. А для випадку значень показника поглинання менше 10^{-3} , другий параметр Стокса аерозольних частинок практично повністю визначається лише показником заломлення, а тому для більшої частини природного атмосферного аерозолу можна припустити, що він лише розсіює світло.

Однак, різноманітність форми та структури частинок полідисперсного ансамблю аерозолу погано піддається моделюванню і може суттєво вплинути на точність інтерпретації моніторингових даних.

Аналіз фазових і спектральних залежностей другого параметра Стокса дає змогу одночасно визначати такі параметри, як показник заломлення, показник поглинання, максимум і дисперсію функції розподілу за розмірами, оптичну товщину шляхом порівняння їх із модельними, найперше для довжин хвиль більше 500 нм, де можливо знехтувати внеском газової складової атмосфері.

Аналіз залежності другого параметру Стокса в широкому інтервалі фазових кутів дозволяє отримати найточніші моніторингові дані, однак на практиці можна використовувати його спектральну дисперсію, припускаючи, що у робочому спектральному діапазоні знехтовно мала дисперсія показника заломлення, що наближено справджується для великого класу аерозолів різної природи у видимому діапазоні довжин хвиль.

Також існує метод визначення характеристик атмосферного аерозолу за допомогою четвертого параметру Стокса, який визначається лише багатократним розсіянням. Отримані в результаті оцінки характеристик аерозолу є усередненими по більшій

товщині атмосфері і, за наявності висотної стратифікації аерозолу, можуть не збігатися із результатами отриманими за допомогою другого параметру Стокса, а різниця несе інформацію про вертикальний розподіл аерозолу.

Показник поглинання оцінюється за спектральними значеннями альbedo однократного розсіяння аерозолем, однак такий метод дає велику похибку через нехтування вертикальним розподілом аерозолу, крім того, результати методу також суттєво залежать від обраної модельної форми частинок. Наприклад, у разі субмікронних розмірів частинок, похибка у визначенні показника поглинання може досягати 100% в залежності від модельної форми частинок.

ВИСНОВКИ. Дослідження матриці розсіяння і характеристик атмосферного аерозолу за допомогою спектрополяриметрії можна умовно розділити на два типи - одноканальне дослідження при різних фазових кутах та багатоканальне дослідження при одному фазовому куті.

При тому, що одноканальне дослідження другого компоненту Стокса при різних фазових кутах дає більш точні результати, такий метод не дає можливості відстежувати динамічні зміни у аерозольній компоненті атмосфері, а також ускладнює імплементацію глобального екологічного моніторингу.

На основі спектральних і фазових залежностей другого параметру Стокса обернено розсіяного сонячного випромінювання можливо визначити показник заломлення, показник поглинання, максимум і дисперсію функції розподілу за розмірами, оптичну товщину атмосферного аерозолу.

На основі даних моніторингу четвертого параметру Стокса по-перше можна уточнити дані, отримані на основі моніторингу другого параметру Стокса, а по-друге зробити певні висновки про їх вертикальну стратифікацію.

ЛІТЕРАТУРА

1. Про фрактальний механізм взаємозв'язку між генезисом, розміром і складом атмосферних аерозолів у районах м. Одеси та Української антарктичної станції / В.Д. Русов, В.М. Павлович, Р. Іліч та інш. // Вісник Київського ун-ту. Серія: фіз.-мат. науки. – Київ. – Вип. 4/2003. – С. 415–427.
2. О фрактальном механизме взаимосвязи между генезисом, размером и содержанием атмосферных аэрозолей в различных регионах Земли / В.Д. Русов, В.М. Павлович, Р. Іліч та інш. // Український антарктичний журнал. – Київ. – Вип. 4–5/2006. – С. 137–159.
3. Raes F., Dingenen R.V., Vignati E., et al. Formation and cycling aerosols in global troposphere // Atmospheric Environment. – Vol. 34/2000. – PP. 4215–4240.
4. Haywood J. and Boucher O. Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: A review // Reviews of Geophysics. – Vol. 38/2000. – PP. 513–543.
5. Piers F., Ramaswamy V., Artaxo P., et al. 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. – PP. 129–234.

6. Lohmann U. Aerosol Effects on Clouds and Climate // *Space Sci. Rev.* – Vol. 125/2006. – PP. 129–137.

7. Rosenfeld D. Aerosol-Cloud Interactions Control of Earth Radiation and Latent Heat Release Budgets // *Space Sci. Rev.* – Vol. 125/2006. – PP. 149–157.

8. Ackerman A.S., Toon O.B., Stevens D.E., et.al. Reduction of tropical cloudiness by soot // *Science.* – Vol. 288/2000. – PP. 1042–1047.

9. Koren I., Kaufman Y.J., Remer L.A. and Martins J.V. Measurement of the effect of Amazon smoke on inhibition of cloud formation // *Science.* – Vol. 303/2004. – PP. 1342–1345.

10. Cohen A.J., Anderson R.H., Ostro B., et.al. The global burden of disease due to outdoor air pollution // *J.Toxicol. Environ. Health Part A.* – Vol. 68/2005. – PP. 1301–1307.

11. Franchinia M. and Mannucci P.M. Air pollution and cardiovascular disease // *Thrombosis Research.* – Vol. 129, Iss. 3/2012. – PP. 230–234.

12. Mokdad A.H., Marks J.S., Stroup D.F. and Gerberding J.L. Actual Causes of Death in the United

States, 2000 // *J. Amer. Med. Assoc.* – Vol. 291/2004. – PP. 1238–1245.

13. Rosenfeld D. TRMM observed first direct evidence of smoke from forest fires inhibiting rainfall // *Geophysical Research Letters.* – Vol. 26/1999. – PP. 3105–3108.

14. Pope C.A., Burnett R.T., Thun M.J., et.al. Cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution // *J. Amer. Med. Assoc.* – Vol. 287/2002. – PP. 1132–1141.

15. Nawrot T.S., Perez L., Künzli N., et.al. Public health importance of triggers of myocardial infarction: a comparative risk assessment // *The Lancet.* – Vol. 377/2011. – PP. 732–740.

16. Андоньев С.М., Зайцев Ю.С., Филипьев О.В. Пылегазовые выбросы предприятий черной металлургии. – Харьков: ЕМЗ, 1998. – 246 с.

17. Гаргер Е.К. Вторичный подъем радиоактивного аэрозоля в приземном слое атмосферы. – Черновобиль: Книга, 2008. – 192 с.

18. Мороженко О.В. Методи і результати дистанційного зондування планетних атмосфер. – К.: Наукова думка, 2004. – 647 с.

PROSPECTS OF ATMOSPHERIC AEROSOL REMOTE SPECTROPOLARIMETRIC MONITORING

Zh. Patlashenko

State Ecological Academy of Post-graduate Education and Management

vul. V. Lypkivskogo, 35, Kyiv, 03035, Ukraine. E-mail: deazh@ukr.net.

Purpose. In this paper the problem of atmospheric aerosol is considered, first of all its environmental impact. Aerosol pollution is a serious threat to human health and biosphere state. Therefore it is imperative to provide for full-scale global and regional aerosol monitoring. Remote optical investigation methods, such as passive spectropolarimetry and active lidarometry offer an efficient tool for this problem solution. **Originality.** This paper considers theory and prospects of atmospheric aerosol remote spectropolarimetry. Implementation of small-size spectropolarimeters at monitoring satellites will enable efficient investigation of main atmospheric aerosol parameters. **Results.** Atmospheric aerosol structure and properties significantly vary. Natural and anthropogenic aerosols cause dramatic impact at environment state and climate, moreover there are also serious negative health effects. There are direct, indirect and semi-direct aerosol climate effects that directly or indirectly change atmosphere transparency and Earth surface albedo in different spectral bands. Increase in aerosol pollution of the atmosphere causes constantly increasing human mortality due to respiratory, cardiovascular, cancer diseases, etc. While large aerosols particles are efficiently filtered by epipharynx, particles below 10 mkm size reach lungs alveolus and particles below 2,5 mkm transport into blood directly or indirectly causing ~5 % of mortality due to cancer and cardiopulmonary diseases. Particles below 100nm can directly influence on most of body internal organs. Therefore, aerosol pollution should be regulated not only by total aerosol mass, but also by particles total surface, indirectly pointing to average particle size. Also some anthropogenic aerosols are very toxic and hazardous. Such are aggressive chemical or poisonous substances, viruses and bacteria or hot radioactive aerosols which are much more dangerous than external radiation and can suspend in the atmosphere for over 30 days. Contemporary monitoring is mainly based on contact methods, such as filters and air samples mass-spectrometry leading to very limited sounding efficiency and coverage. These methods are a basis for national and international law due to their high accuracy and reliability. Remote sounding methods such as remote spectrometry, photometry, photopolarimetry or intensity lidarometry are forced to use rough regional-and-seasonal models of atmospheric aerosol for data interpretation, leading to low accuracy and reliability of ecological data. In case of non-regular natural and anthropogenic events such volcano eruptions, hurricanes, industrial emergencies, etc, only non-informative optical absorbency value can be determined. Therefore, modern state of remote optical methods does not solve the problem of high-quality remote sounding, however, it could have provided for efficient regional and global monitoring. The atmospheric aerosol interaction with light polarization is described by a quasi symmetrical Muller scattering matrix constituting 16 components, which transforms incident light Stokes vector to the scattered light Stokes vector. Specific components of the matrix depend on aerosol anisotropic particles optical properties and their orientation. All independent matrix components can be determined only in case there is a way to control the incident light polarization state, i.e. by active methods, such as lidars. However, analysis of phase and spectral dependency of scattered light polarization by passive methods also provides for aerosol properties determination. Light scattering by aerosol is a complex theoretical problem that cannot be solved completely. The aerosol particles are separated into 'large' and 'small' (relative to wavelength) and are sorted according to some generalized shape and surface roughness criteria. Experimental investigation reveals that simple contemporary aerosol optical properties models, such as Mi theory, are unable to provide high accuracy and yield errors of up to 100%. In general, second Stokes parameter value and indicatrix strongly depend on particles size distribution

function and their refraction index and forms variety mainly in upper atmosphere layers. Moreover, refraction index determination is weakly dependent on absorption index and particles shape. The second Stokes parameter phase dependency comparison with theory gives the most accurate results, however, in case of remote global monitoring, spectral dependency may also be used considering refraction index dispersion known or negligible, which is approximately true for a wide range of natural aerosols. Absorption index can also be determined, but high error might be introduced due to unknown aerosol vertical distribution and variable shape. Another method for aerosol properties determination is fourth Stokes parameter monitoring, which is formed by multiple scattering, therefore difference between the data obtained by second and fourth Stokes parameters monitoring provides information on aerosol vertical stratification. **Practical value.** The results of the investigation can be practically used for regional and global satellite and ground-based remote spectropolarimetric aerosol monitoring to increase its quality and efficiency. References 18, figure 1.

Key words: Spectropolarimetry, Stokes-polarimetry, aerosol, ecology, atmosphere.

REFERENCES

- Rusov, V.D., Pavlovykh, V.M., Ilich, R., Yachimovich, R., Bondarchuk, Yu.O., Vashchenko, V.M., and Mikhalus, O.T. (2003), "About fractal mechanism for interaction between genesis, size and compound of atmospheric aerosol near Odessa and Ukrainian antarctic station", *Bulletin of University of Kyiv. Series: Physics & Mathematics*, vol. 4, pp. 415–427.
- Rusov, V.D., Pavlovykh, V.N., Ilich, R., Yachimovich, R., Bondarchuk, Yu.A., Vashchenko, V.N., Mikhalus, O.T., and Kosenko, S.L. (2006), "On fractal mechanism for interaction between genesis, size and compound of atmospheric aerosol in different regions of the Earth", *Ukrainskyi antarktychnyi zhurnal*, vol. 4–5, pp. 137–159.
- Raes, F., Dingenen, R.V., Vignati, E., Wilson, J., Putaud, J., Seinfeld, J.H., and Adams, P. (2000), "Formation and cycling aerosols in global troposphere", *Atmospheric Environment*, Vol. 34, No. 25, pp. 4215–4240.
- Haywood, J., and Boucher, O. (2000), "Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: A review", *Reviews of Geophysics*, Vol. 38, pp. 513–543.
- Piers, F., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Berntsen, T., Betts, R., Fahey, D., Haywood, J., et al. (2007), "Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change", *Cambridge University Press*, pp. 129–234.
- Lohmann, U. (2006), "Aerosol Effects on Clouds and Climate", *Space Sci. Rev.*, Vol. 125, pp. 129–137.
- Rosenfeld, D. (2006), "Aerosol-Cloud Interactions Control of Earth Radiation and Latent Heat Release Budgets", *Space Sci Rev.*, Vol. 125, pp. 149–157.
- Ackerman, A.S., Toon, O.B., Stevens, D.E., Heymsfield, A.J., Ramanathan, V., and Welton, E.J. (2000), "Reduction of tropical cloudiness by soot", *Science*, Vol. 288, pp. 1042–1047.
- Koren, I., Kaufman, Y.J., Remer, L.A., and Martins, J.V. (2004), "Measurement of the effect of Amazon smoke on inhibition of cloud formation", *Science*, Vol. 303, pp. 1342–1345.
- Cohen, A.J., Anderson, R.H., Ostro, B., Pandey, K.D., Krzyzanowski, M., Kunzli, N., Gutschmidt, K., Pope, A., Romieu, I., Samet, J.M., and Smith, K. (2005), "The global burden of disease due to outdoor air pollution", *J.Toxicol. Environ. Health Part A*, Vol. 68, pp. 1301–1307.
- Franchina, M., and Mannucci, P.M., (2012), "Air pollution and cardiovascular disease", *Thrombosis Research*, Vol. 129, Iss. 3, pp. 230–234.
- Mokdad, A.H., Marks, J.S., Stroup, D.F., and Gerberding, J.L. (2004), "Actual Causes of Death in the United States, 2000", *J. Amer. Med. Assoc.*, Vol. 291, pp. 1238–1245.
- Rosenfeld, D., (1999), "TRMM observed first direct evidence of smoke from forest fires inhibiting rainfall", *Geophysical Research Letters*, Vol. 26, pp. 3105–3108.
- Pope, C.A., Burnett, R.T., Thun, M.J., Calle, E.E., Krewski, D., Ito, K., and Thurston, G.D. (2002), "Cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution", *J. Amer. Med. Assoc.*, Vol. 287, pp. 1132–1141.
- Nawrot, T.S., Perez, L., Künzli, N., Munters, E., and Nemery, B. (2011), "Public health importance of triggers of myocardial infarction: a comparative risk assessment", *The Lancet*, Vol. 377, pp. 732–740.
- Adoniev, S.M., Zaytsev, Yu.S., Filipiev, O.V., (1998), *Pylegazovyye vybrosy predpriiaty chernoy metallurgii* [Dust and gas discharges of iron metallurgy], E.M.Z., Kharkiv, Ukraine.
- Garger, E.K. (2008), *Vtorichnyy podiem radioaktivnogo aerolia v prizemnom sloie atmosfery* [Secondary lift of radioactive aerosol to the near-surface layer of the atmosphere], Kniga, Chernobyl, Ukraine.
- Morozenko, O.V. (2004), *Metody i rezultaty dystantsiynogo zonduvannia planetnykh atmosfer* [Methods and results of remote sounding of planetary atmospheres], Naukova Dumka, Kyiv, Ukraine.

Стаття надійшла 15.10.2015.