

<https://doi.org/10.15407/knit2020.01.059>

УДК 551.510.42

Н. С. МЕТЕЛЬСКАЯ¹

старш. науч. сотруд., канд. физ.-мат. наук,

E-mail: nata.miat@gmail.com

А. И. БРИЛЬ¹

вед. науч. сотруд., канд. физ.-мат. наук

А. П. ЧАЙКОВСКИЙ¹

зав. Центром, канд. физ.-мат. наук,

А. С. ФЕДОРЕНКО¹

науч. сотруд.

Г. П. МИЛИНЕВСКИЙ^{2,3}

зав. лаб., глав. науч. сотруд., д-р физ.-мат. наук

E-mail: genmilinevsky@gmail.com

¹ Гос. науч. учр. «Институт физики имени Б. И. Степанова НАН Беларуси»,

Пр-т Независимости 68-2, Минск, Республика Беларусь, 220072

² Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,

ул. Владимирская 60, Киев, Украина, 01033

³ Главная астрономическая обсерватория НАН Украины,

ул. Академика Заболотного 27, Киев, Украина, 03143

КОМПЛЕКСНЫЙ СПУТНИКОВЫЙ И НАЗЕМНЫЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ МОНИТОРИНГ АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ ЛИДАРНЫМИ И РАДИОМЕТРИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АССИМИЛЯЦИИ ДАННЫХ

Алгоритм обработки данных комбинированных наземных измерений лидаров и радиометров модифицирован для комплексной обработки данных наземных радиометров и космического лидара, что позволяет расширить область применения метода лидарно-радиометрического зондирования. В настоящей работе для комплексной обработки данных использовались совмещённые в пространстве и времени измерения радиометрами сети AERONET и космическим лидаром CALIOP/CALIPSO. Сигналы обратного рассеяния лидара CALIOP усреднялись по выборке индивидуальных лидарных измерений на отрезке траектории спутника в окрестностях станции AERONET. Длина отрезка составляла примерно 100...200 км, что соответствует выборкам из 300...600 измерений, позволяющих существенно уменьшить вклад шумов в сигналах CALIOP. Для валидации такого подхода проводился комплексный LRS-эксперимент, в рамках которого использовались совпадающие во времени и пространстве наземные многоволновые лидарные измерения, измерения лидаром CALIOP и радиометрические измерения в сети AERONET. Для дальнейшего расширения области применения метода лидарно-радиометрического зондирования использована оптимальная интерполяция по данным наблюдений на станциях AERONET и результатам расчёта по химико-транспортной модели GEOS-Chem. В разработанном приложении метода оптимальной

Цитування: Метельська Н. С., Бриль А. И., Чайковский А. П., Федоренко А. С., Милиневский Г. П. Комплексный спутниковый и наземный региональный мониторинг атмосферного аэрозоля лидарными и радиометрическими системами с использованием ассимиляции данных. *Космічна наука і технологія*. 2020. **26**, № 1 (122). С. 59—71. <https://doi.org/10.15407/knit2020.01.059>

интерполяции учитываются как пространственные, так и временные корреляционные зависимости значений наблюдений. Построены пространственные и временные корреляционные зависимости содержания аэрозоля в атмосфере восточно-европейского региона. Оптимальная интерполяция данных наблюдений с учётом среднестатистических значений и результатов моделирования позволяет получить наименьшую погрешность оценки в применении к ассимиляции данных радиометрических наблюдений.

Ключевые слова: аэрозоль, лидарно-радиометрическое зондирование, химико-транспортная модель GEOS-Chem, оптимальная интерполяция.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы комплексное лидарное и радиометрическое зондирование (Lidar&Radiometric Sounding, LRS) становится одним из основных методов исследования атмосферы, позволяющих определять высотные распределения оптических параметров аэрозоля, в том числе концентраций аэрозольных мод в неоднородном атмосферном слое [5, 7]. Программная реализация этого метода (код LIRIC [7]) активно используется на станциях Европейской лидарной сети EARLINET, оснащенных солнечными фотометрами/радиометрами сети AERONET [12, 20].

В настоящее время более 400 солнечных радиометров AERONET [9, 13] осуществляют регулярные наблюдения в различных геофизических регионах. В то же время число лидарных систем, обладающих необходимыми техническими характеристиками для проведения измерений LRS и расположенных совместно с радиометрами AERONET, на порядок меньше. Кроме того, в ближайшем будущем не ожидается значительного увеличения количества комбинированных лидарных и радиометрических станций. Сравнительно небольшое количество совмещенных лидарных и радиометрических станций ограничивает возможности метода LRS для целей глобального мониторинга атмосферного аэрозоля наземными средствами.

Реальной возможностью расширить область применения LRS является использование измерений спутниковых многоволновых лидаров, таких как CALIOP на борту спутника CALIPSO [19]. Основной восстанавливаемой характеристикой аэрозолей с помощью алгоритмов группы CALIOP являются высотные распределения коэффициентов ослабления (aerosol extinction

profiles) [18]. Для получения дополнительной информации об аэрозолях в настоящей работе выполнена комплексная LRS-обработка данных совмещенных (в пространстве и времени) измерений космическим лидаром CALIOP и радиометрами сети AERONET. В работе будет описана процедура обработки комбинированных данных AERONET/CALIOP и приведен пример сопоставления вертикальных профилей концентраций мелкодисперсной и крупнодисперсной фракций аэрозоля, восстановленных по данным двух типов совместных измерений: 1) наземного радиометра и наземного лидара; 2) наземного радиометра и космического лидара CALIOP.

Совмещенные в пространстве и времени AERONET/CALIOP данные составляют крайне малую долю всех доступных измерений AERONET и CALIOP. Для увеличения этой доли с целью дальнейшего расширения области применения LRS возможно использование методов ассимиляции данных, позволяющих восстанавливать поля элементов в узлах некоторой регулярной сетки по данным, полученным в пунктах наблюдений. Одним из наименее затратных с вычислительной точки зрения является метод оптимальной интерполяции. В методе используются результаты моделирования и статистическая связь между значением рассматриваемой величины в точке оценивания и значением величины в пространственно-временных точках, для которых известны результаты наблюдений.

Ниже будет описан метод оптимальной интерполяции по данным наблюдений на станциях AERONET и результатам расчёта по химико-транспортной модели GEOS-Chem [4] и приведены результаты оценивания распределения объёмной концентрации аэрозоля в восточно-европейском регионе.

СИНЕРГИЯ НАЗЕМНЫХ И КОСМИЧЕСКИХ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ И ЛИДАРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Первоначально LRS-алгоритм и реализующее его программное обеспечение LIRIC [7] были разработаны для обработки данных комбинированных наземных измерений лидаров и радиометров. В алгоритме предполагается, что лидар обеспечивает измерения сигнала обратного рассеяния на трех длинах волн (355, 532 и 1064 нм) или на двух длинах волн с поперечной и параллельной составляющими поляризации лидарного сигнала для одной из длин волн.

В алгоритме аэрозоль моделируется в виде смеси K аэрозольных мод, состоящей из сферических и сфероидальных частиц, для которых функции распределения объёма по размерам $dV_k(r)/d\ln(r)$, $k = 1, \dots, K$, а также комплексный показатель преломления n одинаковы для различных типов частиц. Доля сферических частиц в аэрозольной смеси («сферичность») полагается не зависящей от размеров частиц. Аэрозольный слой характеризуется двумя наборами параметров: а) интегральными параметрами, описывающими аэрозольный слой в целом, включая распределение аэрозольных мод по размерам, их общее содержание (интегральные концентрации), комплексный показатель преломления и «сферичность»; а также б) изменяющимися по высоте h концентрациями аэрозольных мод.

На основе функции распределения частиц по размерам выделяются две фракции аэрозоля (мелкодисперсная и крупнодисперсная) с граничным радиусом порядка 0.5 микрометра, как это принято в алгоритме восстановления характеристик аэрозоля научной группы AERONET [8]. Распределение частиц по размерам для каждой фракции и показатель преломления аэрозоля считаются независимыми от высоты. Если доступны измерения компонентов поперечной и параллельной поляризации сигналов, сферические и несферические частицы крупнодисперсной моды рассматриваются в алгоритме как разные фракции. Космический лидар CALIOP обеспечивает измерения полного сигнала обратного рассеяния на двух длинах волн (532 и 1064 нм), а также интенсивности поперечно-

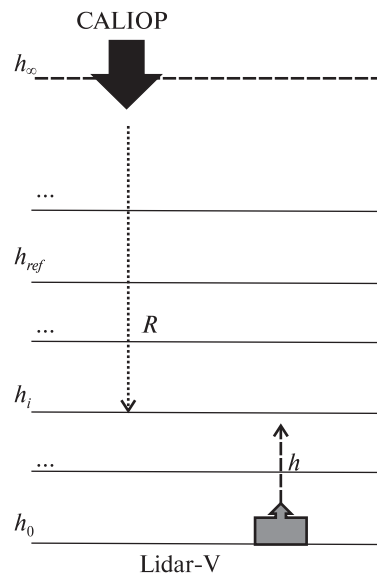


Рис. 1. Схемы измерений космическим лидаром CALIOP и виртуальной системой «Lidar-V»

ляризованного компонента сигнала на длине волны 532 нм. В работе [2] было показано, что восстановленные профили концентрации для $K = 3$ или 2 претерпевают лишь незначительные изменения после исключения из входного набора данных лидарного сигнала на длине волны 355 нм. Это даёт основания полагать, что данные CALIOP достаточны для определения параметров аэрозоля с помощью алгоритма LRS и пакета программ типа LIRIC.

Структура исходного кода LIRIC (включая интерфейс и процедуры обработки данных) учитывает тот факт, что и радиометр, и лидар находятся на уровне земли. Для минимизации изменений структуры кода при обработке комбинированных данных AERONET/CALIOP лидарные сигналы, измеренные CALIOP на уровне h_∞ (высота орбиты спутника CALIPSO), преобразуются в сигналы виртуальной системы «Lidar-V» [4] на уровне земли (рис. 1).

Умноженный на квадрат расстояния лидарный сигнал CALIOP $S_{C,j}^*(R_i) = P_{C,j}(\lambda_j, R_i)R_i^2$ можно записать с помощью следующего уравнения:

$$S_{C,j}^*(R_i) = E_{C,j} \xi_{C,j} \beta_j(\lambda_j, R_i) T_j^2(\lambda_j, R_i) = E_{C,j} \xi_{C,j} \beta_j(\lambda_j, R_i) \frac{T_j^2(\lambda_j, R_{h_0})}{T_j^2(\lambda_j, R_{h_0, h_i})}, \quad (1)$$

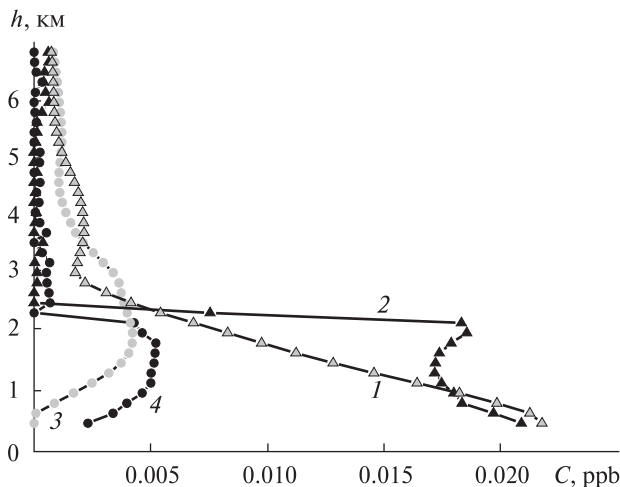


Рис. 2. Сопоставление профилей концентраций крупнодисперсной (1, 2) и мелкодисперсной (3, 4) фракций аэрозоля, восстановленных на основе измерений 19 мая 2017 г. солнечным радиометром и многоволновым лидаром (2, 4) станции Минск (Беларусь), а также космическим лидаром CALIOP (1, 3)

где j — номер приемного канала, R_i — расстояние от спутника до зондируемого объема, $P_{C,j}(\lambda_j, R_i)$ — измеренный сигнал CALIOP на длине волны λ_j после вычитания фона, $E_{C,j}$ — средняя энергия лазера CALIOP, $\xi_{C,j}$ — системный параметр CALIOP (учитывающий, в частности, чувствительность лидарной системы при каждом измерении), $\beta_j(\lambda_j, R_i)$ — коэффициент обратного рассеяния на расстоянии R_i , $T_j(\lambda_j, R_i)$ — пропускание слоя атмосферы от уровня CALIOP (h_∞) до уровня зондируемого рассеивающего объема на расстоянии R_i .

Умноженный на квадрат расстояния сигнал виртуального лидара $S_{V,j}^*(h_i) = P_{V,j}(\lambda_j, h_i)h_i^2$ можно записать аналогичным образом:

$$S_{V,j}^*(h_i) = E_{V,j}\xi_{V,j}\beta_j(\lambda_j, h_i)T_j^2(\lambda_j, h_i). \quad (2)$$

С использованием уравнений (1) и (2), соотношение между $S_{V,j}^*(h_i)$ и $S_{C,j}^*(R_i)$ можно записать в виде

$$S_{V,j}^*(h_i) = \frac{E_{V,j}\xi_{V,j}S_{C,j}^*(R_i)T_j^4(\lambda_j, h_i)}{E_{C,j}\xi_{C,j}T_j^2(\lambda_j, R_{h_0})}. \quad (3)$$

С учётом уравнения (3) соотношение между измеренным лидарным сигналом $\hat{\mathbf{L}}^*$ и концентрациями аэрозольных мод может быть записано

в виде векторного уравнения:

$$\hat{\mathbf{L}}^* = \hat{\mathbf{L}}(\lambda, \mathbf{c}_k(\mathbf{h}), \mathbf{a}_k, \mathbf{b}_k) + \Delta_{\mathbf{L}}. \quad (4)$$

В этом уравнении компоненты $\hat{\mathbf{L}}^*$ определяются из выражения

$$\hat{L}_{V,j}^*(h_i) = \frac{S_{C,j}^*(h_i)}{S_{C,j}^*(h_{ref})} \exp(2\delta_{h,h_{ref}}\tau_{r,j}(h_i, h_{ref})), \quad (5)$$

где $\delta_{h,h_{ref}}$ — вспомогательная функция:

$$\delta_{h,h_{ref}} = \begin{cases} 1, & h \leq h_{ref}, \\ -1, & h > h_{ref}. \end{cases} \quad (6)$$

Модельную лидарную функцию $L_{V,j}$ можно записать в виде

$$L_{V,j}(h_j) = \frac{\beta_j(h_j) \exp(-2\delta_{h,h_{ref}}\tau_{a,j}(h_j, h_{ref}))}{\beta_{r,j}(h_{ref})\Omega(\lambda_j, h_{ref})}, \quad (7)$$

где $\tau_{r,j}(h_i, h_{ref})$ — оптическая толщина молекулярного ослабления для диапазона (h_i, h_{ref}) , $\tau_{a,j}(h_i, h_{ref})$ — оптическая толщина аэрозольного ослабления, $\Delta_{\mathbf{L}}$ — вектор неопределенностей измерений,

$$\Omega(\lambda_j, h_{ref}) = \frac{\beta_{a,j}(h_{ref}) + \beta_{r,j}(h_{ref})}{\beta_{r,j}(h_{ref})}, \quad (8)$$

$\beta_{a,j}(h_{ref})$ и $\beta_{r,j}(h_{ref})$ — коэффициенты аэрозольного и молекулярного обратного рассеяния соответственно.

Уравнения (4)–(7) составляют основу процедуры обработки лидарных данных для получения параметров аэрозоля на основе комбинированных данных AERONET/CALIOP. Основным различием между уравнениями (4)–(7) и соответствующими уравнениями алгоритма для обработки данных двух наземных систем [7] является замена знака на противоположный в показателях экспонент в уравнениях (5) и (7). Это отличие учитывается простой коррекцией вычислительного модуля кода при сохранении интерфейса и процедуры обработки данных исходной версии программного обеспечения LIRIC.

В качестве примера использования модифицированного алгоритма на рис. 2 представлены вертикальные профили концентраций мелкодисперсной и крупнодисперсной фракций аэрозоля, полученные путём совместной обработки

данных наземных измерений (солнечные радиометры и лидары) и данных космического лидара CALIOP в окрестностях комплексной лидарной и радиометрической станции в г. Минск (Беларусь). В случае наземного лидара входными данными модифицированного кода LIRIC являются локальные измерения, усреднённые по временному интервалу ΔT , равному примерно 1 ч. При обработке измерений CALIOP усреднение выполнялось по выборке лидарных измерений на отрезке траектории спутника (длина отрезка $\Delta L \approx 200$ км), которые выполнялись за промежутки времени менее 1 мин. Поскольку для нормировки профилей концентраций, полученных по данным наземного и космического лидаров, использовались общие интегральные концентрации аэрозольных фракций, восстановленные по данным измерений AERONET [2], отличие профилей удобно характеризовать коэффициентом корреляции Пирсона χ . В рассматриваемом случае $\chi = 0.46$ для мелкодисперсной фракции и $\chi = 0.92$ для крупнодисперсной фракции.

Различия между профилями концентраций аэрозоля, восстановленными по данным наземных и спутниковых измерений, могут быть обусловлены неэквивалентностью временного и пространственного усреднения лидарных сигналов, а также различиями во времени и местоположении для различных типов измерений.

ОПТИМАЛЬНАЯ ИНТЕРПОЛЯЦИЯ ДАННЫХ НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЬНЫХ РАСЧЁТОВ И СРЕДНЕСТАТИСТИЧЕСКИХ ЗНАЧЕНИЙ

Наземные измерения ограничены в пространстве и времени. Комплексная обработка данных наземных радиометров и космического лидара возможна только в тех пунктах, где расположены станции AERONET. Однако разработанный алгоритм можно было бы применить в любой точке, для которой сделана оценка величин, получаемых из наблюдений AERONET. Такая оценка может быть осуществлена на основе расчётов по модели переноса загрязняющих примесей в атмосфере с учётом химических преобразований. Однако модели несовершенны; результаты модельных расчётов могут иметь значительную

погрешность [10, 15–17, 22]. К тому же модели могут недостаточно оперативно реагировать на изменяющуюся обстановку, поскольку данные поступления примесей в атмосферу, используемые в моделях, обрабатываются не оперативно, а с запаздыванием [4]. Поэтому в настоящее время всё большее распространение получает ассимиляция данных наблюдений в модели переноса. В широком смысле ассимиляция может рассматриваться как объединение данных наблюдений и моделирования, осуществлённое любым разумным способом.

Среди методов ассимиляции наиболее простым и наименее затратным с вычислительной точки зрения является метод оптимальной интерполяции. Задача оптимальной интерполяции была впервые сформулирована Колмогоровым [2] и получила дальнейшее развитие в работах [3, 21]. Применительно к оцениванию состояния атмосферы метод оптимальной интерполяции был разработан Л. С. Гандиным [1].

Задача оптимальной интерполяции заключается в том, чтобы оптимальным в некотором смысле образом оценить значение элемента в точке оценивания, если этот элемент принял определённые значения в некоторых базовых точках (в пунктах, где осуществляются измерения). Оценка ищется в виде линейной комбинации известных значений рассматриваемой величины в базовых точках. Весовые коэффициенты определяются из требования минимальности средней квадратичной погрешности оценки. Оптимальная интерполяция может осуществляться как для самих величин, так и для их отклонений от некоторого предварительного поля, которое может представлять собой средние за большой временной период значения рассматриваемой величины, или значения, полученные в результате моделирования, или в результате любым способом осуществлённого прогноза. Если поля рассматриваемых величин или их отклонений от предварительного поля можно полагать однородными и изотропными для достаточно больших расстояний и промежутков времени, то возможно рассчитать заранее корреляционную функцию, зависящую только от расстояния и временного промежутка между точками пространственно-временной сетки.

В выборе предварительного поля есть определённый произвол. В методе, предложенном Гандиным [1], в качестве предварительного поля используются средние по времени значения элемента (в предположении стационарности процесса). Позже в качестве предварительного поля стали использоваться результаты расчётов по различным моделям. При произвольном выборе между средними и модельными значениями во внимание принимается один из источников информации (модельные расчёты или средние значения), а второй отбрасывается. В зависимости от выбора предварительного поля будут различными результаты оценивания. Известно, что средняя квадратичная погрешность оценки уменьшается при увеличении числа независимых источников информации, принимаемых во внимание при нахождении наилучшей оценки. Поэтому мы предлагаем при нахождении наилучшей оценки учитывать как средние, так и модельные значения с соответствующими весовыми коэффициентами.

Источники информации можно разделить на три категории:

- 1) значения наблюдений;
- 2) модельные значения;
- 3) средние по времени значения элемента.

Среднее значение элемента в каждой точке оценивания является единственным и всегда существует в случае стационарного процесса. Количество независимых наблюдений в некоторой пространственно-временной точке оценивания может быть любым. При этом мы принимаем во внимание наблюдения не только непосредственно в точке оценивания, но и лежащие в пределах зоны корреляции (как пространственной, так и временной). Результаты модельных расчётов есть в каждой точке оценивания.

Наилучшее приближение ищем в виде

$$\hat{x}_o = \sum_{i=1}^m k_{oi}^{(y)} y_i + k_o^{(b)} b_o + k_o^{(a)} a_o. \quad (9)$$

Средняя квадратичная погрешность равна

$$E^2 = \overline{(x_o - \hat{x}_o)^2} = \overline{\left(x_o - \sum_{i=1}^m k_{oi}^{(y)} y_i - k_o^{(b)} b_o - k_o^{(a)} a_o \right)^2}, \quad (10)$$

где x_o — истинное значение элемента в точке оценивания, \hat{x}_o — оценка, y_i — значение наблюдения в базовой точке, b_o — модельное значение в точке оценивания, a_o — среднее значение элемента в точке оценивания, $k_{oi}^{(y)}$ — весовой коэффициент значения наблюдения в i -й базовой точке, входящей в зону корреляции данной точки оценивания, (\cdot) — весовой коэффициент модельного значения в точке оценивания, $k_o^{(a)}$ — весовой коэффициент среднего значения в точке оценивания, m — количество базовых точек, входящих в зону корреляции точки оценивания.

Средняя квадратичная погрешность оценки минимальна, если её частные производные по весам равны нулю. Продифференцировав, получим систему линейных уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial E^2}{\partial k_{oi}^{(y)}} = 2 \sum_{j=1}^m k_{oj}^{(y)} \overline{y_i y_j} - 2 \overline{x_o y_i} + 2 k_o^{(b)} \overline{y_i b_o} + 2 k_o^{(a)} \overline{a_o y_i}, \\ \frac{\partial E^2}{\partial k_o^{(b)}} = 2 k_o^{(b)} \overline{b_o^2} - 2 \overline{x_o b_o} + 2 \sum_{i=1}^m k_{oi}^{(y)} \overline{y_i b_o} + 2 k_o^{(a)} \overline{a_o b_o}, \\ \frac{\partial E^2}{\partial k_o^{(a)}} = 2 k_o^{(a)} \overline{a_o^2} - 2 \overline{x_o a_o} + 2 \sum_{i=1}^m k_{oi}^{(y)} \overline{a_o y_i} + 2 k_o^{(b)} \overline{a_o b_o}. \end{cases} \quad (11)$$

Приравнивая к нулю частные производные и проведя преобразования, получим

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^m k_{oj}^{(y)} (a_i a_j + g_{ij}^{(x)} + \delta_{ij} \xi^{(y)2}) + k_o^{(b)} (a_i a_o + g_{io}^{(x)}) + k_o^{(a)} a_o^2 = a_o a_i + g_{oi}^{(x)}, \\ k_o^{(b)} (a_o^2 + \sigma^{(x)2} + \xi^{(b)2}) + \sum_{i=1}^m k_{oi}^{(y)} (a_i a_o + g_{io}^{(x)}) + k_o^{(a)} a_o^2 = a_o^2 + \sigma_o^{(x)2}, \\ k_o^{(a)} a_o^2 + \sum_{i=1}^m k_{oi}^{(y)} a_o^2 + k_o^{(b)} a_o^2 = a_o^2, \end{cases} \quad (12)$$

где $g_{ij}^{(x)} = \overline{q_i^{(x)} q_j^{(x)}}$ — ковариация истинных аномалий в точках i и j , $q_i^{(x)}$ — отклонение истинного значения от среднего в точке i , $\xi^{(y)2}$ — средняя квадратичная погрешность наблюдений, $\xi^{(b)2}$ — средняя квадратичная погрешность модели, $\sigma^{(x)2}$ — дисперсия истинных значений, a_i — среднее значение элемента в точке i .

Решение системы уравнений (12) позволяет получить весовые коэффициенты, используемые в выражении для оценки (9).

Мы использовали предложенный подход к методу оптимальной интерполяции для оценки пространственно-временного распределения аэрозоля на основе данных наблюдений международной радиометрической сети AERONET. В сети AERONET путём обработки измерений прямого и рассеянного солнечного излучения определяется объёмная концентрация аэрозоля [$\text{мкм}^3/\text{мкм}^2$], характеризующая содержание аэрозоля во всей толще атмосферы над данной географической точкой и представляющая собой толщину слоя аэрозоля, который образуется, если весь аэрозоль, содержащийся в вертикальном столбе атмосферы, опирающемся на участок поверхности единичной площади, осадить на этот участок.

По данным наблюдений на восьми наиболее активных станциях сети AERONET в Восточной Европе (Belsk, Bucharest_Inoe, CLUJ_UBB, Iasi_LOASL, Kyiv, Minsk, Moscow_MSU_MO, Toravere) за весь период проведения наблюдений (от 4 до 17 лет для различных станций) рассчитан усреднённый коэффициент корреляции отклонений значений объёмной концентрации от среднестатистического значения в зависимости от промежутка времени и от расстояния для восточно-европейского региона. Временная и пространственная корреляционные зависимости показаны на рис. 3 и 4 соответственно.

Модельные расчёты проведены с использованием химико-транспортной модели GEOS-Chem [9]. Модель GEOS-Chem является одной из наиболее полных и показывает результаты, не уступающие по точности другим известным моделям. Входными данными для модели являются базы данных поступления химических компонентов и аэрозолей в атмосферу и метеорологические данные. Расчётная сетка модели GEOS-Chem «привязана» к сетке метеорологических полей системы GEOS (Goddard Earth Observing System) [11]. Базы данных поступления компонентов в атмосферу используются как глобальные, так и региональные. Источники газообразных загрязнителей в GEOS-Chem разделены на четыре основные категории: антропогенные источники, сжигание биотоплива, микробиологические процессы, горение биомассы. От-

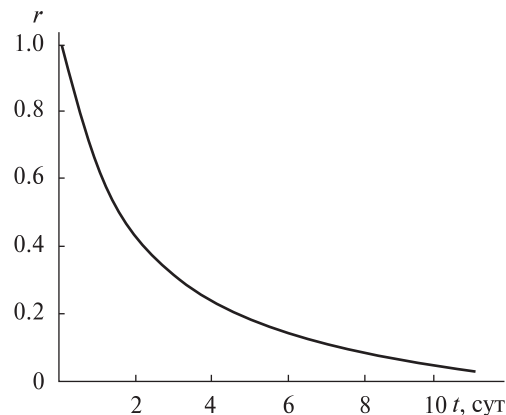


Рис. 3. Зависимость коэффициента корреляции от времени для значений наблюдений объёмной концентрации аэрозоля в атмосфере над восточно-европейской территорией

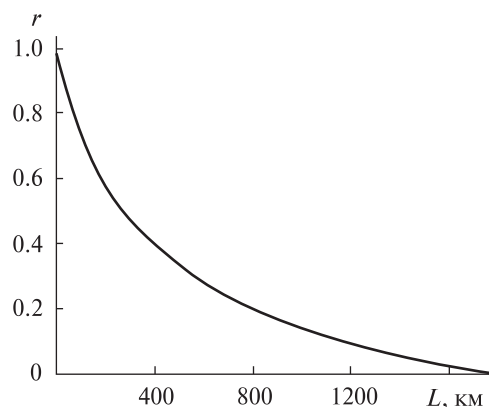


Рис. 4. Зависимость коэффициента корреляции от расстояния для значений наблюдений объёмной концентрации аэрозоля в атмосфере над восточно-европейской территорией

дельно рассматриваются источники аэрозольного загрязнения. Используемые базы данных поступления аэрозолей в атмосферу включают антропогенные выбросы, выбросы в результате сжигания биотоплива, горения биомассы, извержений вулканов, поступления из морской воды, выветривания. В модель включены следующие микрофизические процессы: образование частиц, рост, коагуляция, осаждение и вымывание. Результатом моделирования является распределение концентраций атмосферных примесей в пространстве и времени.

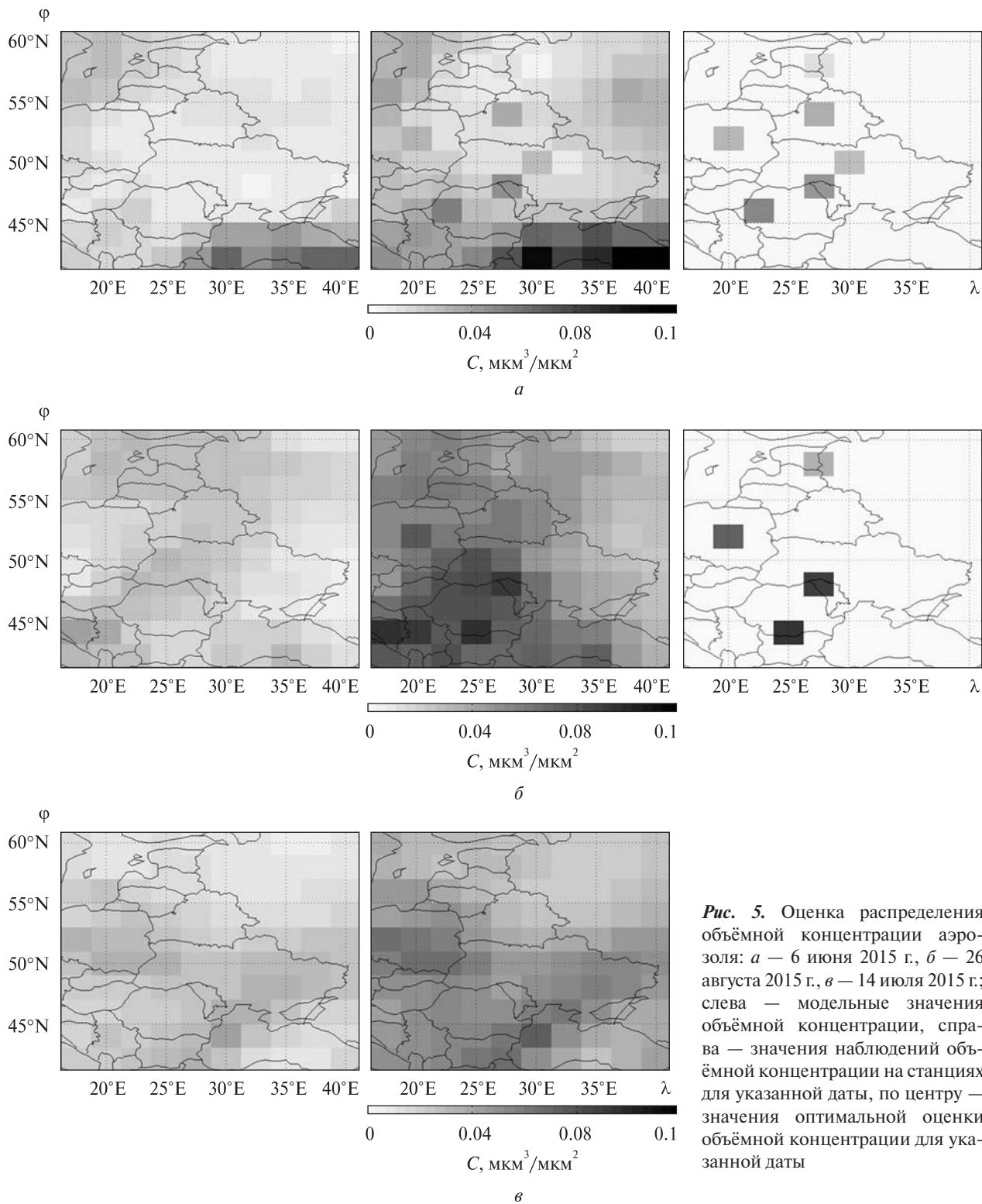


Рис. 5. Оценка распределения объёмной концентрации аэрозоля: *a* — 6 июня 2015 г., *б* — 26 августа 2015 г., *в* — 14 июля 2015 г.; слева — модельные значения объёмной концентрации, справа — значения наблюдений объёмной концентрации на станциях для указанной даты, по центру — значения оптимальной оценки объёмной концентрации для указанной даты

Для настоящей работы использовалась версия GEOS-Chem v11-01, в которой отслеживаются 24 аэрозольных трассера: сульфаты, нитраты, аммоний, минеральная пыль (четыре фракции с эффективными радиусами около 0.7, 1.4, 2.4, 4.5 мкм), морская соль мелкодисперсной (эффективный радиус от 0.01 до 0.5 мкм) и крупнодисперсной (эффективный радиус от 0.5 до 8.0 мкм) фракций, неорганический углерод в гидрофильной и гидрофобной формах, органический углерод в гидрофильной и гидрофобной формах, 11 видов вторичного органического аэрозоля. Нитраты, сульфаты, аммоний, морская соль и вторичные органические аэрозоли считаются гидрофильными, минеральная пыль — гидрофобной. В стандартном варианте модели первичные органические аэрозоли за исключением органического углерода не являются трассерами. Для их учёта при расчёте содержания суммарного аэрозоля концентрация органического углерода, как гидрофильного, так и гидрофобного, умножается на коэффициент 2.1 [22].

Для учёта увеличения объёма гидрофильных частиц в результате увлажнения в GEOS-Chem вводится фактор гигроскопического роста, рассчитываемый для каждого вида аэрозоля для каждой ячейки пространственной сетки модели в зависимости от относительной влажности воздуха. С учётом гигроскопического роста аэрозольных частиц нами проведены расчёты среднесуточной объёмной концентрации суммарного аэрозоля.

На основе данных измерений на станциях AERONET и расчётов по модели GEOS-Chem нами осуществлена пространственно-временная оптимальная интерполяция для среднесуточных значений объёмной концентрации аэрозоля за 2015—2017 гг. На рис. 5 показано несколько примеров результатов оценивания

распределения объёмной концентрации аэрозоля в восточно-европейском регионе на основе метода оптимальной интерполяции по данным наблюдений на станциях AERONET и результатам расчёта по модели GEOS-Chem с учётом пространственной и временной корреляции. Справа на рис. 5 показаны значения объёмной концентрации аэрозоля по данным измерений AERONET для случайно выбранных дат. Так, из восьми станций в пределах рассматриваемого региона 6 июня 2015 г. работали шесть станций, 26 августа 2015 г. — четыре станции, 14 июля 2015 г. — ни одной. Благодаря использованию не только пространственной, но и временной корреляции оценка получена для всех случаев.

ВЫВОДЫ

Метод совместных наземных лидарно-радиометрических измерений LRS и реализующий его программный пакет LIRIC могут быть адаптированы для обработки данных комплексных наблюдений с использованием наземных радиометров и спутниковых лидаров. Продемонстрирована достаточно высокая корреляция вертикальных профилей концентрации аэрозоля, восстановленных по измерениям с использованием наземного лидара и с использованием спутникового лидара.

Оценка величин, получаемых по наблюдениям наземных радиометров и необходимых для реализации метода LRS, может быть получена для всех ячеек некоторой пространственно-временной сетки с использованием метода оптимальной интерполяции. Методом оптимальной интерполяции на основе данных наблюдений на станциях радиометрической сети AERONET, расчётов по химико-транспортной модели GEOS-Chem и статистически среднего значения получены оценки объёмной концентрации аэрозоля в восточно-европейском регионе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гандин Л. С. *Объективный анализ метеорологических полей*. Ленинград: Гидрометеорологическое изд-во, 1963. 288 с.
2. Колмогоров А. Н. Интерполирование и экстраполирование стационарных случайных последовательностей. *Изв. АН СССР. Сер. матем.* 1941. **5**, № 1. С. 3—14.
3. Яглом А. М. Введение в теорию стационарных случайных функций. *Успехи матем. наук.* 1952. **7**, № 5. С. 3—168.
4. Bey I., Jacob D. J., Yantosca R. M., et al. Global modeling of tropospheric chemistry with assimilated meteorology: Model description and evaluation. *J. Geophys. Res.* 2001. **106**(D19). P. 23073—23095. doi: 10.1029/2001JD000807.
5. Chaikovsky A., Bril A., Dubovik O., et al. CIMEL and multiwavelength lidar measurements for troposphere aerosol altitude distributions investigation, long-range transfer monitoring and regional ecological problems solution: field validation of retrieval techniques. *Optica Pura y Aplicada.* 2004. **37**. P. 3241—3246.
6. Chaikovsky A., Chaikovskaya L., Denishchik-Nelubina N., et al. Lidar & radiometer inversion code (LIRIC) for synergetic processing of EARLINET, AERONET and CALIPSO lidar data. *EPJ Web of Conf.* 2018. **176**. P. 08007.
7. Chaikovsky A., Dubovik O., Holben B., et al. Lidar-Radiometer Inversion Code (LIRIC) for the retrieval of vertical aerosol properties from combined lidar/radiometer data: development and distribution in EARLINET. *Atmos. Meas. Tech.* 2016. **9**. P. 1181—1205.
8. Dubovik O., King M. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from sun and sky radiance measurements. *J. Geophys. Res.* 2000. **105**(D16). P. 20673—20696.
9. Dubovik O., Smirnov A., Holben B. N., et al. Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from Aerosol Robotic Network (AERONET): Sun and sky radiance measurements. *J. Geophys. Res.: Atmospheres.* 2000. **105**(D8). P. 9791—9806.
10. Ford B., Heald C. L. Aerosol loading in the Southeastern United States: reconciling surface and satellite observations. *Atmos. Chem. Phys.* 2013. **13**. P. 9269—9283.
11. GEOS-5 system. URL: <http://gmao.gsfc.nasa.gov/systems/geos5/> (дата звернення 10.10.2019).
12. Granados-Muñoz M. J., Guerrero Rascado J. L., Bravo-Aranda J. A., et al. Retrieving aerosol microphysical properties by Lidar — Radiometer Inversion Code (LIRIC) for different aerosol types. *J. Geophys. Res.: Atmospheres.* 2014. **119**. P. 4836—4858.
13. Granados-Muñoz M. J., Guerrero Rascado J. L., Bravo-Aranda J. A., et al. AERONET — A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote sensing of env.* 1998. **66**, № 1. P. 1—16.
14. Jo D. S., et al. Effects of chemical aging on global secondary organic aerosol using the volatility basis set approach. *Atmos. Environ.* 2013. **81**. P. 230—244.
15. Miatselskaya N., Kabashnikov V., Milinevsky G., et al. Atmospheric aerosol distribution in the Belarus-Ukraine region by the GEOS-Chem model and AERONET measurements. *Int. J. Remote Sensing.* 2016. **37**, № 14. P. 3181—3195.
16. Pye H. O. T., Chan A. W. H., Barclay M. P., et al. Global modeling of organic aerosol: the importance of reactive nitrogen (NO_x and NO_3). *Atmos. Chem. Phys.* 2010. **10**. P. 11261—11276.
17. Shenshen L., Garay M. J., Chen L., et al. Comparison of GEOS-Chem aerosol optical depth with AERONET and MISR data over the contiguous United States. *J. Geophys. Res.* 2013. **118**. P. 1—14.
18. Tackett J. L., Winker D. M., Getzewich B. J., et al. CALIPSO lidar level 3 aerosol profile product: version 3 algorithm design. *Atmos. Meas. Tech.* 2018. **11**. P. 4129—4152.
19. The Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation (CALIPSO). URL: <http://wwwcalipso.larc.nasa.gov/> (дата звернення 10.10.2019).
20. Wagner J., Ansmann A., Wandinger U., et al. Evaluation of the Lidar/Radiometer Inversion Code (LIRIC) to determine microphysical properties of volcanic and desert dust. *Atmos. Meas. Tech.* 2013. **6**. P. 1707—1724.
21. Wiener N. *Extrapolation, interpolation and smoothing of stationary time series*. New York, 1949. 163 p.
22. Yu F. A secondary organic aerosol formation model considering successive oxidation aging and kinetic condensation of organic compounds: global scale implications. *Atmos. Chem. Phys.* 2011. **11**. P. 1083—1099.

Стаття надійшла до редакції 06.08.2019

REFERENCES

1. Gandin L. S. (1963). *An Objective analysis of meteorological fields*. Leningrad: Gidrometeorologicheskoye izdatel'stvo [in Russian].
2. Kolmogorov A. N. (1941). Interpolation and extrapolation of stationary random sequences. *Izv. AN SSSR. Ser. matemat.*, **5** (1), 3—14 [in Russian].
3. Yaglom A. M. (1952). Introduction to the theory of stationary random functions. *Uspekhi matem. nauk*, **7** (5), 3—168 [in Russian].
4. Bey I., Jacob D. J., Yantosca R. M., et al. (2001). Global modeling of tropospheric chemistry with assimilated meteorology: Model description and evaluation. *J. Geophys. Res.*, **106**(D19), 23073—23095. doi: 10.1029/2001JD000807.
5. Chaikovskiy A., Bril A., Dubovik O., et al. (2004). CIMEL and multiwavelength lidar measurements for troposphere aerosol altitude distributions investigation, long-range transfer monitoring and regional ecological problems solution: field validation of retrieval techniques. *Optica Pura y Aplicada*, **37**, 3241—3246.
6. Chaikovskiy A., Chaikovskaya L., Denishchik-Nelubina N., et al. (2018). Lidar & radiometer inversion code (LIRIC) for synergetic processing of EARLINET, AERONET and CALIPSO lidar data. *EPJ Web of Conf.*, **176**, 08007.
7. Chaikovskiy A., Dubovik O., Holben B., et al. (2016). Lidar-Radiometer Inversion Code (LIRIC) for the retrieval of vertical aerosol properties from combined lidar/radiometer data: development and distribution in EARLINET. *Atmos. Meas. Tech.*, **9**, 1181—1205.
8. Dubovik O., King M. (2000). A Flexible Inversion Algorithm for Retrieval of Aerosol Optical Properties from Sun and Sky Radiance Measurements. *J. Geophys. Res.*, **105**(D16), 20673—20696.
9. Dubovik O., Smirnov A., Holben B. N., et al. (2000). Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from Aerosol Robotic Network (AERONET): Sun and sky radiance measurements. *J. Geophys. Res.: Atmospheres*, **105**(D8), 9791—9806.
10. Ford B., Heald C. L. (2013). Aerosol loading in the Southeastern United States: reconciling surface and satellite observations. *Atmos. Chem. Phys.*, **13**, 9269—9283.
11. GEOS-5 system. URL: <http://gmao.gsfc.nasa.gov/systems/geos5/> (Last accessed 06.08.2019).
12. Granados-Muñoz M. J., Guerrero Rascado J. L., Bravo-Aranda J. A., et al. (2014). Retrieving aerosol microphysical properties by Lidar — Radiometer Inversion Code (LIRIC) for different aerosol types. *J. Geophys. Res.: Atmospheres*, **119**, 4836—4858.
13. Holben B. N., Eck T. F., Slutsker I., et al. (1998). AERONET — A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote sensing of env.*, **66** (1), 1—16.
14. Jo D. S., et al. (2013). Effects of chemical aging on global secondary organic aerosol using the volatility basis set approach. *Atmos. Environ.*, **81**, 230—244.
15. Miatselskaya N., Kabashnikov V., Milinevsky G., et al. (2016). Atmospheric aerosol distribution in the Belarus-Ukraine region by the GEOS-Chem model and AERONET measurements. *Int. J. Remote Sensing*, **37**(14), 3181—3195.
16. Pye H. O. T., Chan A. W. H., Barclay M. P., et al. (2010). Global modeling of organic aerosol: the importance of reactive nitrogen (NO_x and NO₃). *Atmos. Chem. Phys.*, **10**, 11261—11276.
17. Shenshen L., Garay M. J., Chen L., et al. (2013). Comparison of GEOS-Chem aerosol optical depth with AERONET and MISR data over the contiguous United States. *J. Geophys. Res.*, **118**, 1—14.
18. Tackett J. L., Winker D. M., Getzewich B. J., et al. (2018). CALIPSO lidar level 3 aerosol profile product: version 3 algorithm design. *Atmos. Meas. Tech.*, **11**, 4129—4152.
19. The Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation (CALIPSO). URL.: <http://wwwcalipso.larc.nasa.gov/> (Last accessed 06.08.2019).
20. Wagner J., Ansmann A., Wandinger U., et al. (2013). Evaluation of the Lidar/Radiometer Inversion Code (LIRIC) to determine microphysical properties of volcanic and desert dust. *Atmos. Meas. Tech.*, **6**, 1707—1724.
21. Wiener N. (1949). *Extrapolation, interpolation and smoothing of stationary time series*. New York.
22. Yu F. (2011). A secondary organic aerosol formation model considering successive oxidation aging and kinetic condensation of organic compounds: global scale implications. *Atmos. Chem. Phys.*, **11**, 1083—1099.

Received 06.08.2019

Н. С. Метельська¹

старший. наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук,

E-mail: nata.miat@gmail.com

А. І. Бриль¹

провід. наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук,

А. П. Чайковський¹

зав. Центра, канд. фіз.-мат. наук

А. С. Федоренко¹

наук. співроб.

Г. П. Міліневський^{2,3}

зав. лаб., голов. наук. співроб., д-р фіз.-мат. наук,

E-mail: genmilinevsky@gmail.com

¹ Держ. наук. уст. «Інститут фізики імені Б. І. Степанова НАН Білорусі»,

Пр-т Незалежності 68-2, Мінськ, Республіка Білорусь, 220072

² Київський національний університет імені Тараса Шевченка,

вул. Володимирська 60, Київ, Україна, 01033

³ Головна астрономічна обсерваторія НАН України,

вул. Академіка Заболотного 27, Київ, Україна, 03143

КОМПЛЕКСНИЙ СУПУТНИКОВИЙ І НАЗЕМНИЙ РЕГІОНАЛЬНИЙ МОНИТОРИНГ АТМОСФЕРНОГО АЕРОЗОЛЮ ЛІДАРНИМИ І РАДІОМЕТРИЧНИМИ СИСТЕМАМИ З ВИКОРИСТАННЯМ АСИМІЛЯЦІЇ ДАНИХ

Алгоритм обробки даних комбінованих наземних лідарних і радіометричних вимірювань, модифікований для комплексної обробки даних наземних радіометрів і космічного лідара, дозволяє розширити границі застосування методу лідарно-радіометричного зондування. В роботі використовувалися суміщені (в просторі і часі) вимірювання радіометрами мережі AERONET і космічним лідаром CALIOP/CALIPSO для комплексної обробки даних. Сигнали зворотного розсіяння лідара CALIOP усереднювалися за вибіркою індивідуальних лідарних вимірювань на відріжку траєкторії супутника в околицях станції AERONET. Довжина відрізка становила приблизно 100...200 км, що відповідає вибірці з 300...600 вимірювань, що дозволяє істотно зменшити внесок шумів у сигналах CALIOP. Для валідації такого підходу проводився комплексний LRS-експеримент, в рамках якого використовувалися сумісні (в часі і просторі) наземні багатохвильові лідарні вимірювання, вимірювання лідара CALIOP і радіометричні вимірювання в мережі AERONET. Для подальшого розширення області застосування методу лідарно-радіометричного зондування використана оптимальна інтерполяція за даними спостережень на станціях AERONET і результатами розрахунку за хіміко-транспортною моделлю GEOS-Chem.

Ключові слова: аерозоль, лідарно-радіометричне зондування, хіміко-транспортна модель GEOS-Chem, оптимальна інтерполяція.

*N. S. Miatselskaya*¹

Senior researcher, Cand. Sci. in Phys. & Math.,

E-mail: nata.miat@gmail.com

*A. I. Bril*¹

Leading researcher, Cand. Sci. in Phys. & Math.

*A. P. Chaikovsky*¹

Head of Centre, Cand. Sci. in Phys. & Math.

*A. S. Fedarenka*¹, Researcher

G. P. Milinevsky^{2,3}

Head of laboratory, Chief Researcher, Dr. Sci. in Phys. & Math.,

E-mail: genmilinevsky@gmail.com

¹ The State Scientific Institution “B. I. Stepanov Institute of Physics of the NAS of Belarus”,

68-2, Nezavisimosti Ave., Minsk, Belarus, 220072

² Taras Shevchenko National University of Kyiv,

60, Volodymirska St., Kyiv, Ukraine, 01033

³ Main Astronomical Observatory, National Academy of Sciences of Ukraine,

27 Akademika Zabolotnoho St., Kyiv, Ukraine, 03143

INTEGRATED SATELLITE AND GROUND-BASED REGIONAL MONITORING OF ATMOSPHERIC AEROSOL BY LIDAR AND RADIOMETRIC SYSTEMS USING DATA ASSIMILATION

The data processing algorithm for combined ground-based measurements by lidars and radiometers is modified for complex data processing of ground-based radiometers and the space lidar. This allows one to expand the scope of the lidar-radiometric sensing method. In the present work, collocated measurements by AERONET network radiometers and CALIOP/CALIPSO space lidar were used for complex data processing. The CALIOP lidar backscatter signals were averaged over a sample of individual lidar measurements on a segment of the satellite trajectory in the vicinity of the AERONET station. The length of the segment was approximately 100...200 km, which corresponds to samples of 300...600 measurements. This makes it possible to reduce the contribution of noise to the CALIOP signals significantly. To validate this approach, an integrated LRS experiment was conducted, in which collocated ground-based multi-wave lidar measurements, CALIOP lidar measurements, and AERONET radiometric measurements were used. For further expansion of the lidar-radiometric sensing method scope, optimal interpolation was implemented using both the observations at the AERONET stations and the simulations by the GEOS-Chem chemical transport model.

Keywords: aerosol, lidar-radiometric sounding, chemical transport model GEOS-Chem, optimal interpolation.