

ОПТИМАЛЬНАЯ ИНТЕРПОЛЯЦИЯ НАБЛЮДЕНИЙ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ СЕТИ AERONET ДЛЯ ОЦЕНКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АЭРОЗОЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ТОЛЩИНЫ В ВОСТОЧНОЕВРОПЕЙСКОМ РЕГИОНЕ

Н. С. Метельская^{1*}, А. И. Бриль¹, А. П. Чайковский¹,
Ю. Ю. Юхимчук², Г. П. Милиневский^{2,3}, А. А. Симон⁴

УДК 535.36;535.214.4

<https://doi.org/10.47612/0514-7506-2022-89-2-246-253>

¹ Институт физики НАН Беларуси,

Минск, Беларусь; e-mail: n.miatselskaya@dragon.bas-net.by

² Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев, Украина;

e-mail: juliuhim@gmail.com

³ Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев, Украина;

e-mail: genmilinevsky@gmail.com

⁴ Национальный центр Малая академия наук Украины, Киев, Украина;

e-mail: andrew_simon@univ.kiev.ua

(Поступила 28 января 2022)

Обосновано применение метода оптимальной интерполяции для ассимиляции редких в пространстве и времени данных наблюдений аэрозольной оптической толщины (АОТ) в химико-транспортной модели. При использовании наблюдений АОТ в наземной радиометрической сети AERONET получены пространственная и временная корреляционные зависимости погрешностей результатов моделирования АОТ по химико-транспортной модели GEOS-Chem. Проведена оптимальная интерполяция данных АОТ сети AERONET с использованием результатов моделирования по GEOS-Chem в качестве предварительного поля для восточноевропейского региона за 2015—2016 гг. Показано, что применение оптимальной интерполяции позволяет более чем на треть уменьшить среднеквадратическую погрешность оценки АОТ в местах, где отсутствуют станции AERONET.

Ключевые слова: ассимиляция данных, оптимальная интерполяция, радиометрическая сеть AERONET, химико-транспортная модель GEOS-Chem, портативный фотометр Microtops II.

The application of the optimal interpolation method for the assimilation of the observational data of aerosol optical thickness (AOT), which are sparse in space and time, in the chemical transport model is herein validated. Assuming the negligible error of AOT observations in the AERONET ground-based radiometric network, spatial and temporal correlation functions of the errors in the results of the AOT simulated by the GEOS-Chem chemical transport model are obtained. The optimal interpolation method is applied to the AERONET data using the GEOS-Chem results as a background field for the Eastern European region for 2015–2016. It is shown that the use of the optimal interpolation method permits to reduce the root-mean-

OPTIMAL INTERPOLATION OF AERONET RADIOMETRIC NETWORK OBSERVATIONS FOR THE EVALUATION OF THE AEROSOL OPTICAL DEPTH DISTRIBUTION IN THE EASTERN EUROPEAN REGION

N. S. Miatselskaya^{1*}, A. I. Bril¹, A. P. Chaikovsky¹, Yu. Yu. Yuhymchuk², G. P. Milinevski^{2,3},
A. A. Simon⁴ (¹B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk,
Belarus; e-mail: n.miatselskaya@dragon.bas-net.by; ²Main Astronomical Observatory of Academy of Science
of Ukraine, Kyiv, Ukraine; e-mail: juliuhim@gmail.com; ³Taras Shevchenko National University
of Kyiv, Kyiv, Ukraine; e-mail: genmilinevsky@gmail.com; ⁴National Center Minor Academy of Sciences
of Ukraine, Kyiv, Ukraine; e-mail: andrew_simon@univ.kiev.ua)

square error of the AOT estimation by more than a third in places where there are no AERONET stations in comparison with the model results.

Keywords: data assimilation, optimal interpolation, AERONET radiometric network, GEOS-Chem chemical-transport model, Microtops II portable photometer.

Введение. Атмосферный аэрозоль оказывает существенное влияние на погоду, климатические изменения и качество воздуха, поэтому большое внимание в мировой науке уделяется исследованию содержания, распределения и динамики аэрозолей в земной атмосфере. Одна из важных характеристик атмосферного аэрозоля — аэрозольная оптическая толщина (АОТ), характеризующая интегральное содержание аэрозоля в вертикальном столбе атмосферы. АОТ может быть получена из измерений солнечного излучения в ослабленном слое атмосферы. Во многих работах обсуждались результаты наблюдений АОТ с различных спутниковых инструментов (радиометров, спектрометров, лидара) (см., например, [1—7]). Однако спутниковые наблюдения могут обладать существенной неопределенностью. Абсолютная неопределенность АОТ, восстановленной из данных спутниковых измерений, оценивается в ± 0.03 — 0.05 [8, 9]. Наземные наблюдения АОТ осуществляются в международной глобальной радиометрической сети AERONET (Aerosol Robotic Network) [9—12] и имеют более высокую точность по сравнению со спутниковыми, но ограничены в пространстве и времени. Для оценки АОТ с полным (в пределах разрешения вычислительной сетки) пространственно-временным покрытием целевой области используются химико-транспортные модели [4, 13—16], однако результаты расчетов по модели имеют большую неопределенность. Относительная среднеквадратическая погрешность модельных расчетов АОТ зависит от длины волны, сезона, региона, размера ячеек пространственно-временной расчетной сетки и для разных моделей может достигать 0.5—0.8 [3, 14, 17]. Модели могут недостаточно оперативно реагировать на изменяющиеся параметры аэрозолей и метеорологические условия. В связи с этим наряду с совершенствованием моделей и измерительных инструментов в последние десятилетия развивается новое направление в мониторинге состояния атмосферы — ассимиляция данных, цель которой состоит в том, чтобы из неоднородных массивов данных различных локальных и дистанционных наблюдений и данных моделирования составить единую четырехмерную картину состояния атмосферы. В основе ассимиляции данных лежит объединение информации из различных источников для получения оптимальной оценки состояния системы. Оценка распределения АОТ важна сама по себе в мониторинге состояния атмосферы, может применяться для валидации сторонних наблюдений (не используемых при ассимиляции) и в качестве псевдонаблюдений в задачах восстановления оптических свойств аэрозоля [18]. Ассимиляция данных наблюдений АОТ с использованием различных химико-транспортных моделей рассматривалась в [19—23].

В настоящей работе ассимиляция данных наблюдений АОТ, полученных в радиометрической сети AERONET, проведена для восточноевропейского региона. Особенностью этого региона является разреженность сетей мониторинга, поэтому оценка состояния атмосферы с помощью ассимиляции данных имеет большое значение. При проведении ассимиляции использовалась химико-транспортная модель GEOS-Chem [24].

Метод ассимиляции данных. Подходы к ассимиляции данных можно разделить на статистические и вариационные. В статистических методах состояние системы рассматривается как реализация одного из множества возможных состояний (ансамбля) и предполагается знание статистических характеристик. Наилучшая линейная несмещенная оценка состояния системы найдена в виде линейной комбинации доступных независимых источников информации [25, 26]:

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{x}^b + \mathbf{K}[\mathbf{y} - \mathbf{H}(\mathbf{x}^b)], \quad (1)$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{B}\mathbf{H}^T(\mathbf{H}\mathbf{B}\mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1}, \quad (2)$$

где $\hat{\mathbf{x}}$ — вектор оценки состояния системы размерностью n ; \mathbf{x}^b — вектор предварительных значений состояния системы (например, среднестатистических значений или результатов модельных расчетов) размерностью n ; \mathbf{K} — матрица весовых коэффициентов размерностью $n \times m$; \mathbf{y} — вектор наблюдений размерностью m ; \mathbf{H} — оператор наблюдений, обеспечивающий связь наблюдений с состоянием системы (если оператор наблюдений нелинейный, его линеаризуют, тогда \mathbf{H} — матрица перехода из пространства наблюдений в пространство состояния размерностью $m \times n$); \mathbf{B} — ковариационная матрица погрешностей предварительного поля размерностью $n \times n$; \mathbf{R} — ковариационная матрица погрешностей наблюдений размерностью $m \times m$.

В задачах оценивания состояния атмосферы размерность n равна количеству рассматриваемых параметров состояния (в настоящей работе — только АОТ), умноженному на количество точек оценивания для каждого параметра в рассматриваемой области; размерность m — количеству наблюдений. Для задач оценивания состояния атмосферы обычно $n \gg m$.

При проведении наилучшей линейной несмещенной оценки делаются предположения о равенстве нулю математического ожидания погрешности наблюдений и погрешности предварительного поля, а также об отсутствии корреляции этих погрешностей друг с другом. Весовые коэффициенты выбираются таким образом, чтобы минимизировать среднеквадратическую погрешность оценки.

Оптимальная интерполяция (ОИ) — метод, в котором весовые коэффициенты не определяются заново на каждом временном шаге, а выражаются через статистические характеристики поля (средние значения, дисперсию, ковариацию элементов) [27]. Распространенным допущением в методе ОИ является однородность и изотропность поля. Для таких полей дисперсия элемента постоянна, а ковариация в двух пространственных точках зависит только от расстояния между точками. Во внимание принимаются не все доступные наблюдения, а только лежащие в области вблизи точки оценивания, в пределах которой сохраняются достаточно высокие значения ковариации элементов поля (что допускает некоторый произвол в выборе этой области). Такое ограничение количества учитываемых наблюдений позволяет не только сократить вычислительные затраты, но и избавиться от ложных корреляций.

Метод последовательного оценивания, использующий рекуррентный алгоритм, в котором ковариационная матрица погрешностей предварительного поля меняется на каждом временном шаге в зависимости от оценки, полученной на предыдущем временном шаге, назван калмановской фильтрацией (КФ) по фамилии автора, предложившего этот метод [28]. Алгоритм КФ состоит из двух этапов — прогноза и корректировки. На этапе прогноза из состояния системы, полученного на предыдущем временном шаге, с помощью оператора модели получают состояние системы на текущем временном шаге:

$$\mathbf{x}_k^b = F_{k-1,k}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}), \quad (3)$$

где k — номер шага по времени; $F_{k-1,k}$ — оператор модели, описывающей эволюцию системы во времени. На этапе корректировки с помощью (1) и (2) делается оптимальная оценка состояния системы на текущем временном шаге. Далее цикл повторяется. Необходимость расчета ковариационных матриц на каждом временном шаге приводит к большим затратам машинного времени.

Вариационное усвоение данных для задач оценки состояния атмосферы впервые предложено в [29]. Вариационные методы основаны на минимизации расстояния между истинным значением и значениями наблюдений. Наилучшей оценкой является значение $\hat{\mathbf{x}}$, доставляющее минимум целевому функционалу $J(\mathbf{x})$:

$$\hat{\mathbf{x}} = \operatorname{argmin} J(\mathbf{x}), \quad (4)$$

$$J(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \{ (\mathbf{x}^b - \mathbf{x}) \mathbf{B}^{-1} (\mathbf{x}^b - \mathbf{x})^T + [\mathbf{y} - \mathbf{H}(\mathbf{x})] \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{y} - \mathbf{H}(\mathbf{x})]^T \}. \quad (5)$$

Первый член в правой части (5) является мерой расстояния между оценкой и предварительным полем, второй — между оценкой и наблюдениями. При решении (5) первым приближением для итераций обычно выбирается предварительное поле. В большинстве подходов к задаче минимизации используют сопряженный оператор модели. Если минимизация целевого функционала проводится с использованием только тех наблюдений, которые относятся к текущему моменту времени, метод является трехмерным. В четырехмерном вариационном методе оценивается состояние системы не в некоторый момент времени, а на некотором временном интервале. Как показано [27, 28], принципиальных различий между статистическим и вариационным подходами не существует. Различия в основном касаются техники вычислений.

Успешное выполнение ассимиляции во многом зависит от того, насколько удачно выбраны метод и алгоритм в приложении к конкретному набору данных наблюдений, набору параметров, оценка которых проводится, и к требованиям, предъявляемым к оценке. При выборе метода ассимиляции в практических приложениях большое значение имеют затраты машинного времени. Вариационные методы предпочтительны в случае нелинейного оператора наблюдений или отсутствия надежной статистической информации, но четырехмерный вариационный метод требует таких вычислительных мощностей, которые доступны только крупным прогнозным центрам [21]. Затраты машинного времени уменьшаются, если использовать упрощенные модели, однако это снижает точность оценки. Большой ресурсозатратностью отличается и метод КФ. Преимуществом КФ является меньшая, чем

в ОИ, среднеквадратическая погрешность оценки. В [22] рассматривалась КФ для ассимиляции наблюдений АОТ сети AERONET. Однако КФ требует постоянной коррекции на наблюдения, в противном случае траектория оценки очень быстро возвращается к модельной траектории в отсутствие наблюдений, а среднеквадратическая погрешность оценки возвращается к среднеквадратической погрешности модели, что сводит на нет преимущества КФ по отношению к ОИ в случае разреженных во времени наблюдений. Как показывают тестовые расчеты, при использовании КФ время возвращения к исходной модельной траектории после последней коррекции на наблюдения менее 1 сут [30]. Поэтому в практических приложениях для ассимиляции АОТ применяются в основном двухмерные вариационные методы и ОИ [19, 20, 31, 32], которые учитывают наблюдения в текущий момент времени. Третье пространственное измерение при ассимиляции АОТ не используется, поскольку АОТ представляет собой величину, интегральную по высоте атмосферы.

В [33—35] предложено использовать в ОИ четвертое измерение — время, которое позволяет учитывать не только пространственную, но и временную корреляцию, что уменьшает погрешность оценки. Учет временной корреляции особенно важен в задачах, где наблюдения разрежены не только в пространстве, но и во времени. Это относится к наблюдениям АОТ, возможным только в дневное время в безоблачную погоду. В [33] проведена ОИ объемной концентрации аэрозоля для отдельных станций AERONET с использованием временной корреляционной зависимости и среднестатистических значений в качестве предварительного поля. В [34, 35] проведена ОИ объемной концентрации аэрозоля для восточноевропейского региона с использованием временных и пространственных корреляционных зависимостей и расчетов по химико-транспортной модели GEOS-Chem с низким пространственным разрешением ($2 \times 2.5^\circ$) в качестве предварительного поля. В настоящей работе представлены результаты ОИ АОТ для восточноевропейского региона с использованием временных и пространственных корреляционных зависимостей, полученных по данным наблюдений европейских станций AERONET и с использованием расчетов по GEOS-Chem с высоким пространственным разрешением в качестве предварительного поля.

Расчеты по химико-транспортной модели GEOS-Chem. В настоящее время разработано несколько десятков глобальных химико-транспортных моделей. Модель GEOS-Chem — одна из наиболее полных, не уступающая по точности другим моделям [24, 36—38]. Входными данными для модели GEOS-Chem являются данные о поступлении химических компонентов и аэрозолей в атмосферу (антропогенных выбросах, выбросах в результате сжигания биотоплива, горении биомассы, извержениях вулканов, поступлении из морской воды, выветривании [38]) и метеорологические данные. Моделируются микрофизические процессы образования аэрозольных частиц, рост, коагуляция, осаждение и вымывание. Основные выходные данные химико-транспортных моделей — массовые концентрации или мольная доля атмосферных примесей, усредненные для каждой ячейки сетки, принятой в модели. АОТ могут быть оценены на основе выходных данных модели. Для расчета АОТ выбрана длина волны 870 нм, широко распространенная в радиометрической сети AERONET.

Для модельных расчетов использован региональный вариант версии v12.1.1 модели GEOS-Chem. В европейском региональном варианте модели расчет ведется с горизонтальным разрешением 0.25° по широте, 0.3125° по долготе для пространственного “окна”, захватывающего большую часть Европы в пределах от 15° западной долготы W до 40° восточной долготы E и от 32.75 до 61.25° северной широты N. Аэрозольные примеси в модели сгруппированы по оптическим свойствам: сульфатно-нитратно-аммонийный аэрозоль, неорганический углерод (сажа), органический аэрозоль, минеральная пыль (с разбиением по размерам на шесть подгрупп), морской соляной аэрозоль (с разбиением на две подгруппы). Среднесуточные значения АОТ для указанных групп аэрозольных примесей рассчитываются в модели по теории Ми в приближении сферичности частиц. Для гидрофильного аэрозоля при расчете АОТ используется фактор гигроскопического роста, зависящий от относительной влажности воздуха. Сульфатно-нитратно-аммонийный и морской аэрозоли в модели полагаются полностью гидрофильными, минеральная пыль полностью гидрофобной. Неорганический углерод делится на гидрофильный и гидрофобный. Первичный органический аэрозоль также делится на гидрофильный и гидрофобный, вторичный полагается гидрофильным. Фактор гигроскопического роста рассчитан для каждой ячейки пространственной сетки с указанным выше горизонтальным разрешением и 47 вертикальными слоями высотой до 80 км. Среднесуточное значение АОТ для каждой горизонтальной ячейки европейского региона рассчитано путем суммирования по типам аэрозоля и по вертикальным слоям. Из органического аэрозоля в модели отслеживается только органический углерод. Для получения АОТ всего органического аэрозоля АОТ органического углерода умножается на 2.1 [39].

Статистическая обработка данных наблюдений радиометрической сети AERONET. Наземные дистанционные наблюдения АОТ осуществляются в международной глобальной сети AERONET, объединяющей более 500 станций. В сети используются многоволновые сканирующие солнечные фотометры фирмы CIMEL, обеспечивающие измерения прямой солнечной и рассеянной радиации в диапазоне 340—1640 нм, а также угловых зависимостей солнечного излучения, ослабленного слоем атмосферы. Измерения и передача данных осуществляются в автоматическом режиме. Алгоритм восстановления [40, 41] позволяет получать ряд характеристик атмосферного аэрозоля, в том числе АОТ. Погрешность наблюдений АОТ в сети AERONET не превышает ± 0.01 для $\lambda > 440$ нм [18, 42, 43]. Для оценки расхождения наблюдаемых и модельных данных сопоставлены среднесуточные АОТ, полученные в сети AERONET и рассчитанные по модели GEOS-Chem, за 2015—2016 гг. Использованы данные уровня 2.0 наилучшего качества для 88 станций, попадающих в европейское “окно”. Коэффициенты корреляции наблюдаемых и модельных значений составляют в среднем 0.45, 0.53 и 0.60 для $\lambda = 870, 675$ и 440 нм соответственно, что согласуется с работами, в которых АОТ, полученная в сети AERONET, сопоставлялась с расчетами по моделям [3, 14, 44]. Разброс АОТ составляет 0.063, 0.078 и 0.118 для длин волн 870, 675 и 440 нм соответственно. Относительное среднеквадратическое отклонение модельных значений АОТ от наблюдаемых 0.83, 0.74 и 0.59 для $\lambda = 870, 675$ и 440 нм соответственно. С учетом этих данных можно сделать вывод, что погрешность моделирования АОТ значительно превышает погрешность наблюдений, поэтому при проведении ОИ рассматривали наблюдения АОТ в сети AERONET как точные. Тогда ковариационную матрицу погрешностей наблюдений можно считать нулевой, а ковариационная матрица погрешностей предварительного поля рассчитывается как ковариационная матрица отклонений модельных значений от наблюдаемых в предположении однородности и изотропности поля отклонений. Сглаженные зависимости коэффициентов корреляции от расстояния и промежутка времени, полученные за 2015—2016 гг. для $\lambda = 870$ нм, приведены на рис. 1.

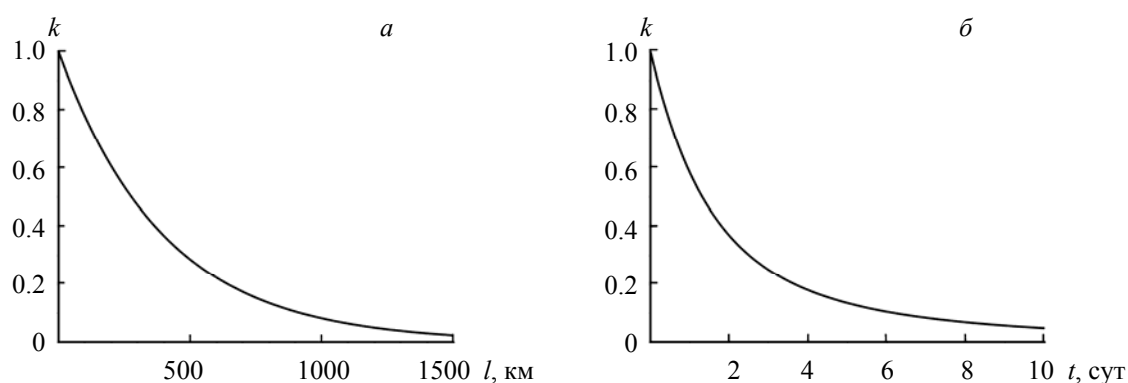


Рис. 1. Зависимости коэффициента корреляции k погрешностей АОТ, рассчитанных по модели GEOS-Chem, от расстояния (а) и промежутка времени (б), $\lambda = 870$ нм

Результаты и их обсуждение. С использованием полученных корреляционных зависимостей осуществлена пространственно-временная оптимальная интерполяция среднесуточных значений АОТ, наблюдаемых в радиометрической сети AERONET за 2015—2016 гг., по формулам (1) и (2) с расчетами по химико-транспортной модели GEOS-Chem в качестве предварительного поля. Оценка распределения АОТ проведена для восточноевропейского региона (от 20 до 40° Е и от 40 до 60° N). На рис. 2 приведены оценка распределения среднесуточной АОТ на $\lambda = 870$ нм в восточноевропейском регионе (для 9 сентября 2015 г.) по модели GEOS-Chem и ОИ данных наблюдений в сети AERONET с использованием показанного распределения в качестве предварительного поля.

Для оценки качества ассимиляции проведено сравнение АОТ, полученных в результате ОИ, с независимыми наблюдениями, выполненными с помощью портативного солнечного фотометра Microtops II [45]. Фотометр Microtops II позволяет осуществлять наблюдения АОТ на $\lambda = 870$ нм с погрешностью не хуже ± 0.02 [46, 47]. При сравнении данные наблюдений с помощью фотометра Microtops II рассматривались как точные. Полевые наблюдения с помощью мобильного фотометра Microtops II, выбранные для сравнения с результатами проведенной оптимальной интерполяции

АОТ, выполнены в виде серии локальных измерений 1—11 сентября 2015 г. в 11 пунктах с различными координатами в окрестностях Киева. Хотя измерений недостаточно для получения надежных статистических характеристик, демонстрирующих изменение погрешности АОТ до и после ОИ, они позволяют провести приближенную оценку. Так, среднеквадратическая погрешность АОТ после проведения ОИ уменьшается на 36 % по сравнению с полученной по модельным расчетам. Следует отметить, что при сравнении может иметь место дополнительная погрешность, связанная с тем, что наблюдения на станциях AERONET и расчеты по GEOS-Chem представлены со среднесуточным усреднением, а данные фотометра Microtops II усреднялись за 1—2 ч, в то время как АОТ в течение дня может значительно изменяться.

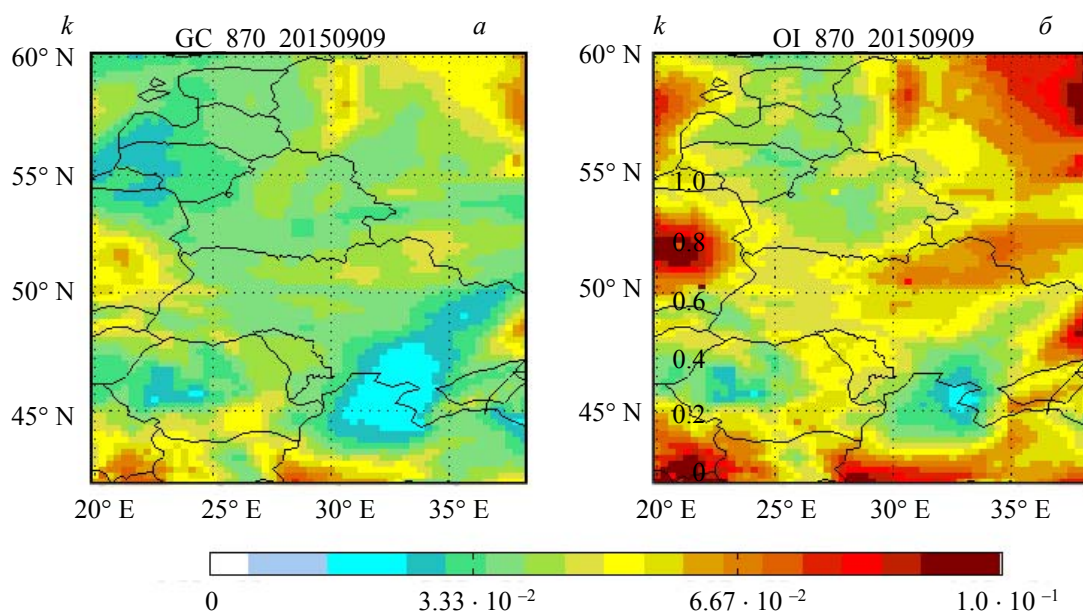


Рис. 2. Оценки распределения среднесуточной АОТ в восточноевропейском регионе для 9 сентября 2015 г. по модели GEOS-Chem (а) и по результатам ОИ (б), $\lambda = 870$ нм

Заключение. Среди методов ассимиляции данных метод оптимальной интерполяции отличается относительными простотой и быстродействием. Преимуществом метода оптимальной интерполяции при ассимиляции разреженных наблюдений является возможность использования как пространственной, так и временной корреляционной зависимости погрешностей предварительного поля и наблюдений. Проведена пространственно-временная оптимальная интерполяция для среднесуточных значений аэрозольной оптической толщины по данным наблюдений радиометрической сети AERONET с использованием результатов расчетов по химико-транспортной модели GEOS-Chem в качестве предварительного поля и корреляционных зависимостей, построенных по данным модельных расчетов и наблюдений на 88 европейских станциях AERONET за 2015—2016 гг. Оптимальная интерполяция проведена для восточноевропейского региона (от 20 до 40° E и от 40 до 60° N). Сравнение с наблюдениями аэрозольной оптической толщины с помощью портативного фотометра Microtops II показало уменьшение среднеквадратической погрешности оценки после оптимальной интерполяции на 36 % по сравнению с полученной по модельным расчетам. Полученные оценки могут использоваться в мониторинге состояния атмосферы и в качестве псевдонаблюдений в задачах восстановления аэрозольной оптической толщины по данным спутниковых измерений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (договор № Ф20УКА-017), Национальной академии наук Украины (договор № 01-01-20/21) и Киевского национального университета имени Тараса Шевченко (договор № 20БФ051-02).

- [1] F. Waquet, J. Riedi, C. Labonnote, P. Goloub, B. Cairns, J.-L. Deuze, D. Tanre. *J. Atm. Sci.*, **66** (2009) 2468—2480
- [2] B. Ford, C. L. Heald. *Atm. Chem. Phys.*, **13** (2013) 9269—9283
- [3] S. Li, M. J. Garay, L. Chen, E. Rees, Y. Liu. *J. Geophys. Res. Atm.*, **118** (2013) 1—14
- [4] C. Carnevale, G. Finzi, G. Mannarini, E. Pisoni, M. Volta. *Atm. Env.*, **45** (2011) 289—295
- [5] A. Bovchaliuk, G. Milinevsky, V. Danylevsky, P. Goloub, O. Dubovik, A. Holdak, F. Ducos, M. Sosonkin. *Atm. Chem. Phys.*, **13** (2013) 6587—6602
- [6] L. Sogacheva, T. Popp, A. M. Sayer, O. Dubovik, M. J. Garay, A. Heckel, N. C. Hsu, H. Jethva, R. A. Kahn, P. Kolmonen, M. Kosmale, G. Leeuw, R. C. Levy, P. Litvinov, A. Lyapustin, P. North, O. Torres, A. Arola. *Atm. Chem. Phys.*, **20** (2020) 2031—2056
- [7] C. Ahn, O. Torres, H. Jethva. *J. Geophys. Res. Atm.*, **119** (2014) 2457—2473
- [8] A. M. Sayer, N. C. Hsu, C. Bettenhausen, M.-J. Jeong. *J. Geophys. Res. Atm.*, **118** (2013) 7864—7872
- [9] B. N. Holben, T. F. Eck, I. Slutsker, D. Tanre, J.P. Buis, A. Setzer, E. Vermote, J. A. Reagan, Y. J. Kaufman, T. Nakajima, F. Lavenue, I. Janowiak, A. Smirnov. *Remote Sens. Environ.*, **66** (1998) 1—16
- [10] M. J. Granados-Munoz, F. Navas-Guzman, J. L. Guerrero-Rascado, J. A. Bravo-Aranda, I. Biniotoglou, S. N. Pereira, S. Basart, J. M. Baldasano, L. Belegante, A. Chaikovsky, A. Comeron, G. D'Amico, O. Dubovik, L. Ilic, P. Kokkalis, C. Munoz-Porcar, S. Nickovic, D. Nicolae, F. J. Olmo, A. Papayannis, G. Pappalardo, A. Rodriguez, K. Schepanski, M. Sicard, A. Vukovic, U. Wandinger, F. Dulac, L. Alados-Arboledas. *Atm. Chem. Phys.*, **16** (2016) 7043—7066
- [11] M. Filonchyk, M. Peterson, H. Yan, S. Yang, A. Chaikovsky. *Atm. Environ.*, **249** (2021) 118237
- [12] A. Chauvigne, K. Sellegri, M. Hervo, N. Montoux, P. Freville, P. Goloub. *Atm. Meas. Tech.*, **9** (2016) 4569—4585
- [13] J. Meier, I. Tegen, I. Mattis, R. Wolke, L. Alados Arboledas, A. Apituley, D. Balis, F. Barnaba, A. Chaikovsky, M. Sicard, G. Pappalardo, A. Pietruczuk, D. Stoyanov, F. Ravetta, V. Rizi. *Atm. Environ.*, **47** (2012) 519—532
- [14] S. Li, C. Yu, L. Chen, J. Tao, H. Letu, W. Ge, Y. Si, Y. Liu. *Atm. Environ.*, **141** (2016) 320—332
- [15] M. Chin, P. Ginoux, S. Kinne, O. Torres, B. N. Holben, B. N. Duncan, R. V. Martin, J. A. Logan, A. Higurashi, T. Nakajima. *J. Atm. Sci.*, **59** (2002) 461—483
- [16] S. Kinne, U. Lohmann, J. Feichter, M. Schulz, C. Timmreck, S. Ghan, R. Easter, M. Chin, P. Ginoux, T. Takemura, I. Tegen, D. Koch, M. Herzog, J. Penner, G. Pitari, B. Holben, T. Eck, A. Smirnov, O. Dubovik, I. Slutsker, D. Tanre, O. Torres, M. Mishchenko, I. Geogdzhayev, D. A. Chu, Y. Kaufman. *J. Geophys. Res.*, **108**, N D20 (2003) 4634
- [17] V. Cesnulyte, A. V. Lindfors, M. R. A. Pitkänen, K. E. J. Lehtinen, J.-J. Morcrette, A. Arola. *Atm. Chem. Phys.*, **14** (2014) 593—608
- [18] O. Zawadzka, K. Markowicz. *Remote Sens.*, **6** (2014) 7182—7211
- [19] J. I. Rubin, J. S. Reid, J. A. Hansen, J. L. Anderson, B. N. Holben, P. Xian, D. L. Westphal, J. Zhang. *J. Geophys. Res. Atm.*, **122** (2017) 4967—4992
- [20] W. D. Collins, P. J. Rasch, B. E. Eaton, B. V. Khattatov, J.-F. Lamarque. *J. Geophys. Res.*, **106**, N D7 (2001) 7313—7336
- [21] A. Benedetti, J.-J. Morcrette, O. Boucher, A. Dethof, R. J. Engelen, M. Fisher, H. Flentje, N. Huneus, L. Jones, J. W. Kaiser, S. Kinne, A. Mangold, M. Razinger, A. J. Simmons, M. Suttie. *J. Geophys. Res.*, **114** (2009) 736—749
- [22] N. A. J. Schutgens, T. Miyoshi, T. Takemura, T. Nakajima. *Atm. Chem. Phys.*, **10** (2010) 2561—2576
- [23] M. Schroedter-Homscheidt, H. Elbern, T. Holzer-Popp. *Atm. Chem. Phys.*, **10** (2010) 10435—10452
- [24] I. Bey, D. J. Jacob, R. M. Yantosca, J. A. Logan, B. D. Field, A. M. Fiore, Q. Li, H. Y. Liu, L. J. Mickley, M. G. Schultz. *J. Geophys. Res.*, **106**, N D19 (2001) 23073—23096
- [25] M. Ghil, P. Malanotte-Rizzoli. *Adv. Geophys.*, **33** (1991) 141—266
- [26] M. Asch, M. Bocquet, M. Nodet. *Data Assimilation: Methods, Algorithms, and Applications*, SIAM (2016)
- [27] Л. С. Гандин. Объективный анализ метеорологических полей, Ленинград, Гидрометеорологическое изд-во (1963)
- [28] R. E. Kalman. *Trans. ASME*, **82D** (1960) 35—45

- [29] **Y. Sasaki**. *J. Meteor. Soc. Jpn.*, **36** (1958) 77—88
- [30] **M. Tombette, V. Mallet, B. Sportisse**. *Atm. Chem. Phys.*, **9** (2009) 57—70
- [31] **I. Feis, G. Masiello, C. Serio**. *Proc. SPIE*, **11152** (2019) 111520C
- [32] **C. E. Chung, V. Ramanathan, G. Carmichael, S. Kulkarni, Y. Tang, B. Adhikary, L. R. Leung, Y. Qian**. *Atm. Chem. Phys.*, **10** (2010) 6007—6024
- [33] **N. S. Miatselskaya, V. P. Kabashnikov, H. V. Norka, A. P. Chaikovsky, A. I. Bril, G. P. Milinevsky, V. O. Danylevsky**. *Space Sci. Technol.*, **23** (2017) 3—11
- [34] **N. S. Miatselskaya**. *Proc. SPIE*, **11152** (2019) 1115213
- [35] **Н. С. Метельская, А. И. Бриль, А. П. Чайковский, А. С. Федоренко, Г. П. Милиневский**. *Косм. наука технол.*, **26** (2020) 59—71
- [36] **S.-J. Lin, R. B. Rood**. *Mon. Weather Rev.*, **124** (1996) 2046—2070
- [37] **L. M. Zhang, S. L. Gong, J. Padro, L. Barrie**. *Atm. Environ.*, **35** (2001) 549—560
- [38] **C. A. Keller, M. S. Long, R. M. Yantosca, A. M. Da Silva, S. Pawson, D. I. Jacob**. *Geosci. Model Devel.*, **7** (2014) 1409—1417
- [39] **D. S. Jo, R. J. Park, M. J. Kim, D. V. Spracklen**. *Atm. Environ.*, **81** (2013) 230—244
- [40] **O. Dubovik, M. D. King**. *J. Geophys. Res. Atm.*, **105** (2000) 20673—20696
- [41] **O. Dubovik, A. Sinyuk, T. Lapyonok, B. N. Holben, M. Mishchenko, P. Yang, T. F. Eck, H. Volten, O. Minoz, B. Veihelmann, W. J. Zande, J.-F. Leon, M. Sorokin, I. Slutsker**. *J. Geophys. Res. Atm.*, **111** (2006) D11208
- [42] **T. Eck, B. Holben, J. Reid, O. Dubovik, A. Smirnov, N. O'Neill, I. Slutsker, S. Kinne**. *J. Geophys. Res.*, **104** (1999) 31333—31349
- [43] **B. N. Holben, D. Tanre, A. Smirnov, T. F. Eck, I. Slutsker, N. Abuhassan, W. W. Newcomb, J. S. Schafer, B. Chatenet, F. Lavenu, Y. J. Kaufman, J. Vande Castle, A. Setzer, B. Markham, D. Clark, R. Frouin, R. Halthore, A. Karneli, N. T. O'Neill, C. Pietras, R. T. Pinker, K. Voss, G. Zibordi**. *J. Geophys. Res.*, **106**, N D11 (2001) 12067—12097
- [44] **L. M. David, A. R. Ravishankara, J. K. Kodros, C. Venkataraman, P. Sadavarte, J. R. Pierce, S. Chaliyakunnel, D. B. Millet**. *J. Geophys. Res. Atm.*, **123** (2018) 3688—3703
- [45] **V. Bovchaliuk, A. Bovchaliuk, G. Milinevsky, V. Danylevsky, M. Sosonkin, Ph. Goloub**. *Adv. Astron. Space Phys.*, **3** (2013) 46—52
- [46] **K. D. Knobelspiesse, C. Pietras, G.S. Fargion, M. H. Wang, R. Frouin, M. A. Miller, S. Subramaniam, W. M. Balch**. *Remote Sens. Environ.*, **93** (2004) 87—106
- [47] **A. Smirnov, B. N. Holben, D. M. Giles, I. Slutsker, N. T. O'Neill, T. F. Eck, A. Macke, P. Croot, Y. Courcoux, S. M. Sakerin, T. J. Smyth, T. Zielinski, G. Zibordi, J. I. Goes, M. J. Harvey, P. K. Quinn, N. B. Nelson, V. F. Radionov, C. M. Duarte, R. Losno, J. Sciare, K. J. Voss, S. Kinne, N. R. Nalli, E. Joseph, K. Krishna Moorthy, D. S. Covert, S. K. Gulev, G. Milinevsky, P. Larouche, S. Belanger, E. Horne, M. Chin, L. A. Remer, R. A. Kahn, J. S. Reid, M. Schulz, C. L. Heald, J. Zhang, K. Lapina, R. G. Kleidman, J. Griesfeller, B. J. Gaitley, Q. Tan, T. L. Diehl**. *Atm. Meas. Tech.*, **4** (2011) 583—597