

УДК 504:546:551.510

Определение районов источников аэрозолей, поступающих в центральную часть Украины, методом статистики обратных траекторий

В.П. Кабашников¹, Г.П. Милиневский², А.П. Бовчалюк², В.А. Данилевский²
¹Институт физики им. Б.И.Степанова НАН Беларуси

²Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко

Методика определения районов, содержащих источники выбросов аэрозоля, основанная на совместном статистическом анализе измеренных значений концентрации аэрозолей и расчетов обратных траекторий, была использована для оценки пространственного распределения источников аэрозольных частиц, поступающих в центральную часть Украины по данным станции Киев. Данные по колонным концентрациям мелко- и крупнодисперсного аэрозоля были получены с помощью дистанционных наблюдений с солнечным фотометром на станции Киев сети AERONET. Показано, что северо-восточные (по отношению к станции мониторинга Киев) территории в среднем не вызывают повышенных концентраций крупнодисперсного аэрозоля, а эпизоды максимальных концентраций крупнодисперсного аэрозоля на станции Киев в среднем обусловлены территориями, находящимися на юге и востоке. Мелкодисперсный аэрозоль на станцию Киев приходит в основном из северных и северо-восточных территорий.

ВИЗНАЧЕННЯ РАЙОНІВ ДЖЕРЕЛ АЕРОЗОЛІВ, ЩО НАДХОДЯТЬ У ЦЕНТРАЛЬНУ ЧАСТИНУ УКРАЇНИ, МЕТОДОМ СТАТИСТИКИ ЗВОРОТНИХ ТРАЄКТОРІЙ, Кабашников В.П., Міліневський Г.П., Бовчалюк А.П., Данилевський В.О. — Методика визначення районів, що містять джерела викидів аерозолів, базується на спільному статистичному аналізі вимірних значень концентрації аерозолів і розрахунків зворотних траєкторій, була використана для оцінки просторового розподілу джерел аерозольних частинок, що надходять у центральну частину України за даними станції Київ. Дані про колонні концентрації дрібно- та крупнодисперсного аерозолів були отримані за допомогою дистанційних спостережень з сонячним фотометром на станції Київ мережі AERONET. Показано, що північно-східні (по відношенню до пункту моніторингу Київ) території у середньому не викликають підвищених концентрацій крупнодисперсного аерозолів, а епізоди максимальних концентрацій крупнодисперсного аерозолів на станції Київ головним чином обумовлені територіями, що знаходяться на півдні і сході. Дрібнодисперсний аерозоль на станцію Київ надходить переважно з північних та північно-східних територій.

RETRIEVAL SOURCE AREAS PRODUCING AEROSOLS ARRIVED IN CENTRAL PART OF UKRAINE USING BACK-TRAJECTORY STATISTICS, Kabashnikov V.P., Milinevsky G.P., Bovchaliuk A.P., Danylevsky V.O. — Concentration weighted trajectory method for aerosol sources retrieval technique based on the joint statistical analysis of the aerosol column volume concentrations and back-trajectory data was used to estimate spatial distribution of aerosol sources of particles arrived in the Central Ukraine region and observed at Kyiv site data. The column volume concentration data for Kyiv AERONET network site were used. It was shown that the north-east territories (in relation to Kyiv monitoring site) give small contribution to coarse mode aerosol content. The events of increased coarse mode aerosol concentration have been caused by sources at south-east regions. Fine mode of aerosol particles arrived to the Kyiv station mainly from north and north-eastern territories.

Ключевые слова: атмосфера; источники аэрозоля; перенос; обратная траектория; метод траекторной статистики.

Key words: atmosphere; aerosol source; transfer; back-trajectory; trajectory statistics method.

1. ВВЕДЕНИЕ

Определение положения районов, в которых находятся источники аэрозолей, и оценка их мощности являются важными проблемами контроля состояния окружающей среды [3]. Используя данные по концентрации аэрозоля и соответствующую метеорологическую информацию, в принципе, можно решить обратную задачу и найти распределение мощности источников [4], если известна связь между источником и вызываемой им концентрацией.

Такую связь можно получить на основе моделирования переноса аэрозолей. Ввиду некорректности обратной задачи требования к точности указанной связи должны быть достаточно высоки. При этом помимо высокой точности модели переноса, необходимо детальное знание многих входных параметров, получение которых нереально во многих практических ситуациях. Поэтому для выявления географических областей-источников атмосферных примесей довольно большое распространение получил альтернативный использованию моделей переноса метод траекторной статистики, впервые предложенный в работах [6, 7]. Входными данными этого метода являются данные мониторинга содержания примеси за длительное время (например, за год или несколько лет) и набор обратных траекторий воздушных масс,

приходящих в точку мониторинга в моменты измерения концентрации. Если бы траектории были прямолинейными, можно было установить только направление на источник. Однако с удалением от точки прихода траектории сильно отклоняются от прямолинейных, и над областью-источником пересекается множество траекторий под различными углами. Это обстоятельство позволяет «засечь» положение источника, используя данные мониторинга даже только одной станции. Большое количество измерений и соответствующих им траекторий позволяет установить определенную статистическую связь между уровнем концентрации в пункте мониторинга и территориями, над которыми воздушные массы проходили до прихода в точку мониторинга и определить, таким образом, области, вызывающие повышенную концентрацию аэрозольных загрязнителей в пункте мониторинга.

Различные варианты метода траекторной статистики использовались для выявления регионов-источников оксидов серы и сульфатов [7, 16, 17, 19, 23], оксидов азота и нитратов [17, 23], озона [22], кислотных осадков [9], аэрозолей [10, 18, 20], источников и стоков CO₂ [5], в разных частях земного шара. Для выявления источников аэрозольного загрязнения атмосферы Беларуси методом статистики обратных траекторий в работе [2] использовались данные дистанционного радиометрического мониторинга сети AERONET [13] по колонным концентрациям аэрозоля в Минске.

Цель настоящей работы — выявить основные географические регионы-источники аэрозольных твердых частиц, основываясь на данных дистанционного мониторинга аэрозоля на станции Киев (50.45° N, 30.50° E, высота станции 200 метров над уровнем моря) сети AERONET. В отличие от работы [2], результаты которой относятся только к сумме мелкодисперсной и крупнодисперсной фракций аэрозоля, в настоящей работе определяются отдельно области-источники аэрозолей мелкодисперсной и крупнодисперсной фракций. Работа основывается на данных наблюдений за период 2008–2011 гг. и использует однородные измерения колонных концентраций.

2. ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МЕТОДА

В рассматриваемом методе географическая область, над которой проходят обратные траектории, делится сеткой на ячейки (i, j) , где i, j нумеруют географические координаты (долготу и широту) центра выделенной ячейки. Пусть $c(l)$ — концентрация загрязняющей компоненты, которая фиксируется в пункте мониторинга (в рецепторе) в l -тый момент времени, а $\tau_{ij}(l)$ — время пребывания над территорией (i, j) -той ячейки обратной траектории, которая стартует из пункта мониторинга в момент l -того измерения.

Каждой ячейке (i, j) поставлено в соответствие среднее значение концентрации P_{ij} в рецепторе при условии прохождения траектории над рассматриваемой ячейкой:

$$P_{ij} = \frac{\sum_{l=1}^L c(l)\tau_{ij}(l)}{\sum_{l=1}^L \tau_{ij}(l)} \quad (1)$$

где L — общее количество измерений. Этот вариант метода траекторной статистики известен в литературе как метод траекторий, взвешенных с концентрацией [10]. Параметр P_{ij} имеет физический смысл концентрации, усредненной за все время измерения, которая возникнет в рецепторе, если воздушная масса до прихода в рецептор пройдет над территорией ячейки (i, j) . Ячейки с высокой концентрацией P_{ij} рассматриваются как вероятные источники примеси.

Точность метода траекторной статистики, под которой понимается спирменовская корреляция восстановленных и исходных источников, исследовалась в ряде работ [14, 21]. К сожалению, точность восстановления заданного распределения источников *a priori* установить невозможно. Можно дать лишь статистическую оценку, усредненную по ансамблю всевозможных распределений источников. Как показано в [14], при восстановлении распределения источников на оптимальной площади, то есть на площади, размер которой сравним с расстоянием, проходимым примесью за время ее жизни в атмосфере, точность метода может достигать в среднем 70–75%.

3. ОБРАТНЫЕ ТРАЕКТОРИИ И ДАННЫЕ МОНИТОРИНГА

Обратная траектория отображает путь элементарной воздушной массы в моменты времени, предшествующие ее приходу в заданную географическую точку. Для станции международной сети солнечных фотометров AERONET [13] Киев обратные траектории движения атмосферных масс были рассчитаны нами по программе [1]. Для расчета траекторий использовались данные о поле ветра и температуры в северном полушарии, предоставляемые Республиканским гидрометеоцентром республики Беларусь.

Интегральное по высоте объемное содержание взвешенных частиц (объемное содержание аэрозолей в столбе) в атмосфере оценивалось на основании значений оптической толщи аэрозолей, полученных по данным измерений с солнечными фотометрами типа CIMEL CE318 [13] сети AERONET. Данные об объемном содержании аэрозолей в столбе атмосферы (OCA) мелкодисперсных (частицы с размером меньше около 1 мкм) и крупнодисперсных (частицы с размером более примерно 1 мкм) фракций

аэрозоля на станции мониторинга Киев сети AERONET брались с сайта [24], где они приведены в единицах $\text{мкм}^3/\text{мкм}^2$, означающих объем всех аэрозольных частиц, заключенных в вертикальном столбе атмосферы с сечением 1 мкм^2 .

Как свидетельствуют данные лидарных измерений [8], основное количество аэрозольных частиц содержится в пограничном слое атмосферы на высотах до 1–2 км. В настоящей работе было принято, что крупномасштабное перемещение атмосферных аэрозольных масс можно проследить с помощью обратных траекторий, стартующих на двух высотах 950 гПа (450 м) и 850 гПа (1300 м). В этом случае под $\tau_{ij}(l)$ следует понимать сумму времен пребывания над территорией ячейки (i, j) обратных траекторий, которые стартуют из пункта мониторинга в момент l -того измерения на двух указанных высотах.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ПОЛОЖЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ

С помощью метода траекторий, взвешенных с концентрацией, для каждой ячейки было найдено такое значение концентрации P_{ij} , которое в среднем фиксируется на станции мониторинга Киев при условии предварительного прохождения анализируемых воздушных масс над территорией этой ячейки. Среднее время, за которое воздушные массы проходят от границы территории восстановления до станции мониторинга Киев примерно составляет около 80 часов. Время жизни аэрозольных частиц зависит от их размера и определяется, в основном двумя процессами: гравитационным осаждением и вымыванием осадками. Время жизни частиц крупнодисперсной фракции размером 10 мкм , оцениваемое на основе закона Стокса как время падения с высоты 1 км, оказывается равным 36 часам. С уменьшением размера время осаждения растет обратно пропорционально квадрату размера частиц. Однако фактически время жизни частиц тонкой фракции ограничено временем вымывания осадками [11], составляющим приблизительно 7 суток. Таким образом, выбранная территория восстановления источников близка к оптимальной, так как время жизни частиц сопоставимо с временем прохождения воздушных масс по территории, на которой восстанавливаются источники.

Результаты расчетов по формуле (1) приводятся в виде поля колонной концентрации P_{ij} крупнодисперсной и мелкодисперсной фракций аэрозоля по данным мониторинга. Размер ячейки равен 2° по долготе и 4° по широте, что на широте станции Киев соответствует области с размерами приблизительно $220 \times 280 \text{ км}$.

На рис. 1 представлено поле условно усредненной за период с 2008 по 2011 год колонной концентрации крупнодисперсной и мелкодисперсной фракций аэрозоля по данным мониторинга станции Киев. В обозначениях рис. 1а в градациях серого оттенка показаны минимальные ($0.02 \text{ мкм}^3/\text{мкм}^2$) и максимальные ($0.1 \text{ мкм}^3/\text{мкм}^2$) значения колонной концентрации крупнодисперсной фракции аэрозоля, разделенные на пять оттенков серого с шагом $0.02 \text{ мкм}^3/\text{мкм}^2$. Для мелкодисперсной фракции (рис. 1б) — $0.021 \text{ мкм}^3/\text{мкм}^2$ и $0.058 \text{ мкм}^3/\text{мкм}^2$ с шагом $0.09 \text{ мкм}^3/\text{мкм}^2$.

По данным наших исследований регионы, ответственные за эпизоды повышенных концентраций крупнодисперсного аэрозоля лежат (см. рис. 1) к юго-востоку от Киева. Наибольшие концентрации возникали при предварительном прохождении воздушных масс над территорией Краснодарского края. Несколько меньшие концентрации аэрозоля имели место при ветрах из Ставропольского края, Сербии и акватории Черного моря. Территории, ответственные за эпизоды повышенных концентраций мелкодисперсного аэрозоля, находятся в районе Харькова, Орла, Воронежа, Саратова, а также в районе границы Румынии с Болгарией.

Известно, что подавляющая часть аэрозолей имеет естественное происхождение [11, 15]. Однако количественные данные о пространственном распределении мощности источников аэрозолей естественного происхождения нам не известны. Поэтому представляет интерес сравнить результаты, представленные на рис. 1, с распределениями мощности антропогенных источников крупно- и мелкодисперсных частиц в 2008 году по данным Совместной программы наблюдения и оценки распространения загрязнителей воздуха на большие расстояния в Европе (European Monitoring and Evaluation Programme — ЕМЕР) [12], которые показаны на рис. 2. В обозначениях рис. 2а в градациях серого оттенка показаны минимальные ($10^{2.16}$ тонн/год) и максимальные ($10^{4.63}$ тонн/год) значения мощности антропогенных источников крупнодисперсных частиц, разделенные на пять оттенков серого с шагом $10^{0.62}$ тонн/год. Для мелкодисперсной фракции (рис. 2б) — $10^{2.65}$ тонн/год и $10^{4.66}$ тонн/год с шагом $10^{0.5}$ тонн/год.

Из сопоставления данных, представленных на рис. 1 и 2, можно заключить, что территории, ответственные за повышенные концентрации крупнодисперсных частиц, не совпадают с источниками крупнодисперсных частиц по данным ЕМЕР. Некоторое соответствие можно найти между группой территорий восточнее Киева на рис. 1б, ответственных за повышенные концентрации мелкодисперсного аэрозоля на станции Киев, и источниками на востоке Украины по данным ЕМЕР. Также можно говорить, что источники мелкодисперсного аэрозоля в Румынии, Венгрии и на Балканах (рис. 2б) частично находят свое отражение в условно усредненных концентрациях на юго-западных территориях на рис. 1б. Наиболее сильное расхождение расчета с данными ЕМЕР касается источников в северо-западных областях

на рис. 1 и рис. 2. На месте интенсивных по данным ЕМЕР источников в Польше расчет обнаруживает слабые источники.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе методом траекторной статистики найдены географические регионы, ответственные за эпизоды повышенной концентрации крупно- и мелкодисперсной фракций аэрозолей на станции мониторинга Киев. Для этого использованы данные измерений колонных концентраций аэрозолей, полученных по наблюдениям с солнечным фотометром CIMEL CE318 с 2008 по 2011 г. и результаты расчета обратных траекторий движения воздушных масс в атмосфере [1]. С помощью этой информации для каждого элемента территории, окружающей пункт мониторинга, была найдена условно усредненная концентрация. То есть определено такое значение концентрации, которое в среднем имеет место на станции мониторинга при условии предварительного прохождения анализируемых воздушных масс над рассматриваемым элементом территории. Области повышенной концентрации аэрозоля могут иногда отождествляться с

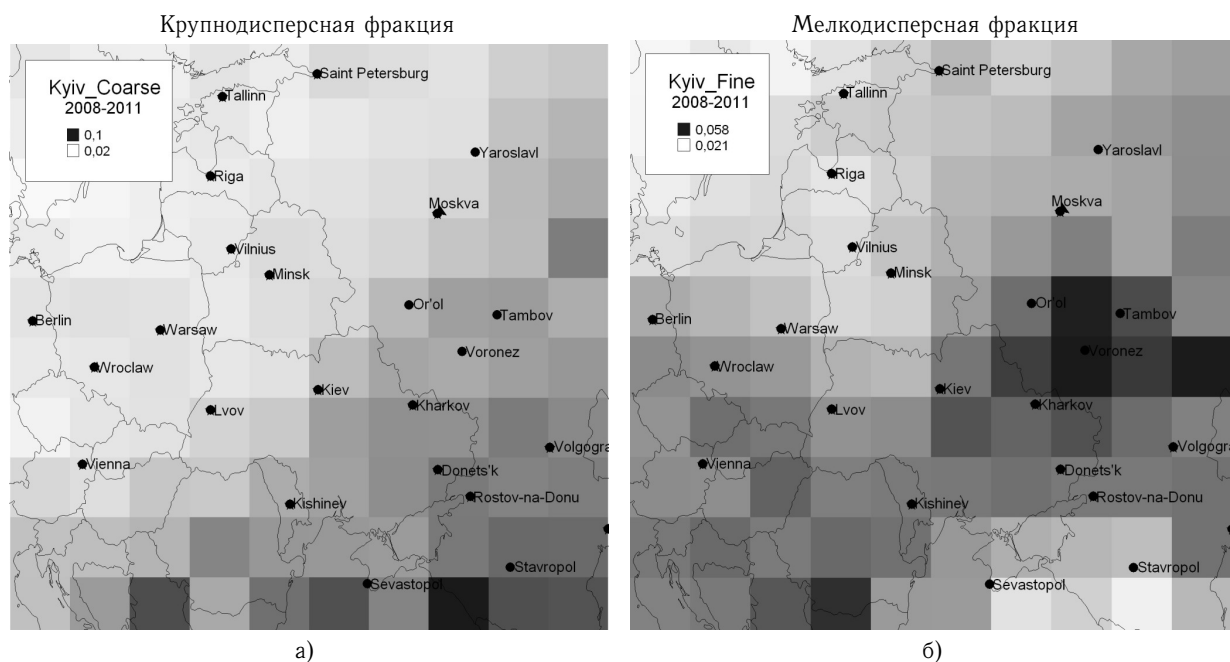


Рис. 1. Поле условно усредненной за период с 2008 по 2011 гг. колонной концентрации крупнодисперсной (а) и мелкодисперсной (б) фракций аэрозоля по данным мониторинга на станции Киев.

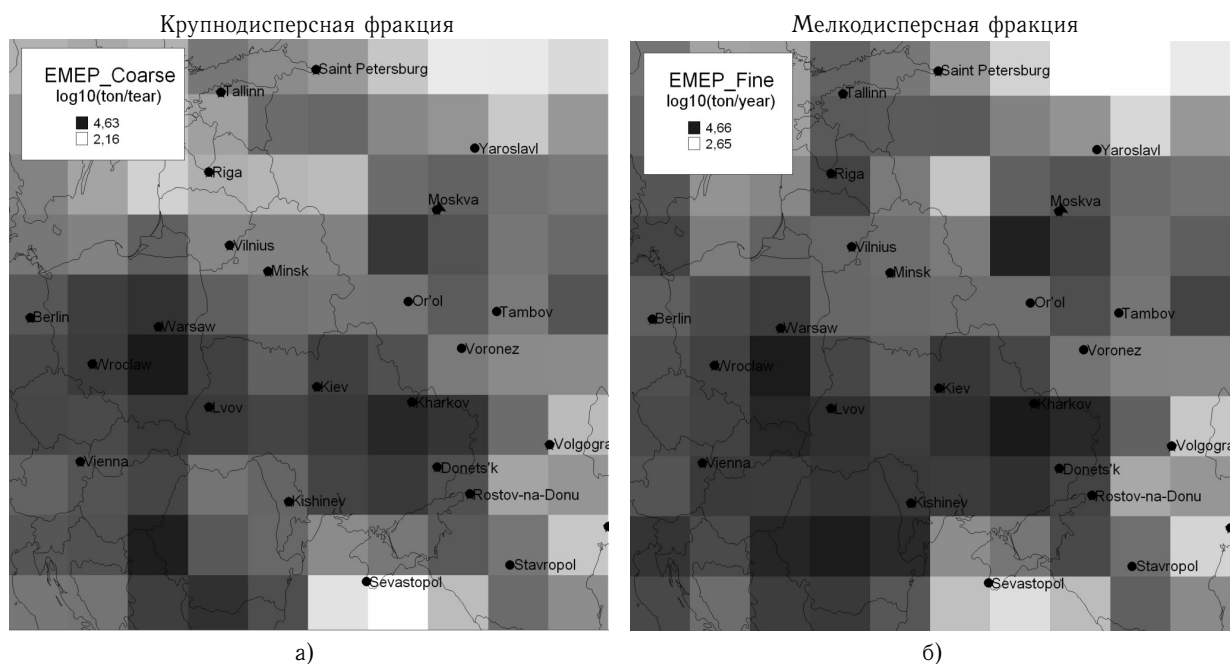


Рис. 2. Распределение источников крупнодисперсной (а) и мелкодисперсной (б) фракций аэрозоля в 2008 году для исследуемого региона по данным ЕМЕР [12].

потенциальными источниками. Условно усредненную концентрацию можно рассматривать как некоторую характеристику, которая дает возможность оценить степень потенциального влияния различных географических регионов на содержание примесей в воздухе в районе станции мониторинга с учетом типичных для станции условий переноса и позволяет получить первую подсказку при определении положения источников, вызывающих наибольшие концентрации в пункте мониторинга.

Несмотря на невысокую точность метода траекторной статистики, можно утверждать, что северо-восточные (на фрагменте схемы, представленной на рис. 1) территории, в среднем не вызывают повышенных концентраций крупнодисперсного аэрозоля. Из полученных данных следует, что, несмотря на преобладающий западный перенос, эпизоды максимальных концентраций крупнодисперсного аэрозоля на станции Киев в среднем возникают при ветрах, дующих с юга и востока. Менее отчетливо, чем для крупнодисперсного аэрозоля, эти закономерности наблюдаются и для мелкодисперсных частиц.

Благодарности. Авторы благодарны Бренту Холбену (Brent Holben) — руководителю проекта AERONET и его группе за предоставление данных и поддержку исследований. Работа частично поддержана в рамках проекта PICS 2013–15, проекта No. UKG2–2969–KV–09 ФЦДР (CRDF) США, проектов 11БФ051–01–12 МОМолодьспорт и Ф11К–88 Белорусского Республиканского фонда фундаментальных исследований. Калибровка солнечного фотометра CIMEL была выполнена в центре калибровок AERONET-EUROPE и Лаборатории оптики атмосферы (LOA) при поддержке программы ASTRIS (European Union Seventh Framework Program FP7/2007–2013, грант 262254).

1. Бурак Р.Н., Деменцова И.А., Кабашиков В.П., Метельская Н.С. TRAJECTORY — программа для расчета траекторий движения воздушных масс // Система управления экологической безопасностью: сб. тр. IV заочной междунар. науч.-практ. конф., Екатеринбург, 27–28 мая 2010 г.: в 2 т. / Екатеринбург, 2010. — Т.2. — С. 127–131.
2. Кабашиков В.П., Кузьмин В.Н., Петручук А., Соболевский П., Чайковский А.П. Выявление источников аэрозольного загрязнения атмосферы на основе данных дистанционного зондирования и статистики обратных траекторий // Оптика атмосферы и океана. — 2008. — **21**, № 1. — С. 48–52.
3. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. — М.: Наука, 1982. — С.320.
4. Рамута В.Ф., Крылова А.И. Обратная задача получения оценок параметров источника примеси в пограничном слое атмосферы // Метеорология и гидрология. — 1995. — **3**. — С. 49–58.
5. Apadula F., Gotti A., Pignini A., et al. Localization of source and sink regions of carbon dioxide through the method of the synoptic air trajectory statistics // Atmos. Environ. — 2003. — **37**, № 18. — P. 3757–3770.
6. Ashbaugh L.L. A statistical trajectory technique for determining air pollution source regions // J. of Air Pollution Control Assessment. — 1983. — **33**, № 12. — P. 1096–1098.
7. Ashbaugh L.L., Malm W.C., Sadeh W.Z. A residence time probability analysis of sulfur concentrations at Grand Canyon National Park // Atmos. Environ. — 1985. — **19**, № 7. — P. 1263–1270.
8. Balin Yu.S., Ershov A.D. Vertical structure of aerosol fields in the atmospheric boundary layer reconstructed from laser sensing data // Atmos. Oceanic Opt. — 1999. — **12**, № 7. — P. 592–599.
9. Charron A., Plaisance H., Sauvage S., et al. A study of the source — receptor relationships influencing the acidity of precipitation collected at a rural site in France // Atmos. Environ. — 2000. — **34**, № 22. — P. 3665–3674.
10. Chen L.-W.A., Watson J.G., Chow J.C., DuBois D.W., and Herschberger L. PM_{2.5} source apportionment: reconciling receptor models for U.S. nonurban and urban long-term networks // Journal of the Air and Waste Management Association. — 2011. — 61. — P. 1204–1217.
11. Dubovik O., Lapyonok T., Kaufman Y.J., et al. Retrieving global aerosol sources from satellites using inverse modeling // Atmos. Chem. Phys. — 2008. — **8**. — P. 209–250.
12. European Monitoring and Evaluation Programme EMEP [Electronic resource]. — (2013) Mode of access: <http://www.ceip.at/ceip/>.
13. Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., et al. AERONET — A federated instrument network and data archive for aerosol characterization // Remote Sens. Environ. — 1998. — **66**. — P. 1–16.
14. Kabashnikov V.P., Chaikovskiy A.P., Kucsera T.L., Metelskaya N.S. Accuracy estimation of the trajectory statistical methods // Atmos. Environ. — 2011. — **45**. — P. 5425–5430.
15. Kondratyev K.Y., Iolev L.S., Krapivin V.F., Varostos C.A. Atmospheric Aerosol Properties: Formation, Processes and Impacts / Praxis Publishing Ltd, Chichester, UK, 2006. — 572 p.
16. Poirot R.L., Wishinski P.R. Visibility, sulfate and air mass history associated with the summertime aerosol in Northern Vermont // Atmos. Environ. — 1986. — **20**, № 18. — P. 1457–1469.
17. Rua A., Hernandez E., de las Parras J., et al. Sources of SO₂, SO₄²⁻, NO_x, and NO₃⁻ in the Air of Four Spanish Remote Stations // Journal of the Air and Waste Management Association. — 1998. — 48, № 9. — P. 838–845.
18. Seibert P., Kromp-Kolb H., Baltensperger U., et al. Trajectory analysis of aerosol measurements at high alpine sites // Transport and Transformation of Pollutants in the Troposphere, Academic Publishing, Den Haag. — 1994.

— P. 689–693.

19. *Stohl A.* Trajectory statistics — a new method to establish source-receptor relationship of air pollutants and its applications to the transport of particulate sulfate in Europe // *Atmos. Environ.* — 1996. — **30**, № 4. — P. 579–587.
20. *Wang Y.Q., Zhang X.Y., Arimoto R.* The contribution from distant dust sources to the atmospheric particulate matter loadings at XiAn, China during spring // *Science of the Total Environment.* — 2006. — **368**, № 2–3. — P. 875–883.
21. *Wotawa, G., Kröeger, H.* Testing the ability of trajectory statistics to reproduce emission inventories of air pollutants in cases of negligible measurement and transport errors // *Atmos. Environ.* — 1999. — **33**, № 18 — P. 3037–3043.
22. *Wotawa G., Kröger H., Stohl A.* Horizontal ozone transport towards the Alps — results from trajectory analyses and photochemical model studies // *Atmos. Environ.* — 2000. — **34**, № 7. — P. 1367–1377.
23. *Zhao W., Hopke P. K., Zhou L.* Spatial distribution of source locations for particulate nitrate and sulfate in the upper-midwestern United States // *Atmos. Environ.* — 2007. — **41**. — C. 1931–1847.
24. http://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/index.html

Поступила в редакцію 14.11.2013

НОВІ ВИДАННЯ



Бурштинська Х.В.

Аерокосмічні знімальні системи: Навч. посібник / Х.В. Бурштинська, С.А. Станкевич. — Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2010. — 292 с.

Розглянуто загальну модель дистанційного зондування Землі, основні типи космічних та авіаційних літальних апаратів, їх можливості та характеристики. Подано принципи формування зображень, структуру, конструктивні особливості, передавальні можливості та технічні характеристики фотографічних, оптико-електронних, оптико-механічних, інфрачервоних, лазерних, мікрохвильових радіометрів (радіотеплових) та радіолокаційних знімальних систем. Охарактеризовано багатоспектральні та гіперспектральні знімальні системи. Розглянуто принципи побудови цифрових моделей рельєфу з використанням лазерних та радіолокаційних знімальних систем.

Книга буде корисною для студентів, аспірантів, науковців — фахівців у галузі дистанційного зондування Землі, геодезії, картографії, фотограмметрії та кадастру.

Зміст

Вступ

1. Загальна модель дистанційного зондування Землі
 2. Лінійна просторово-частотна модель знімальних систем
 3. Знімальні системи з одночасною побудовою та записом (фотографічні)
 4. Сенсори фотографічних знімальних систем
 5. Метрологія аерокосмічних зображень
 6. Знімальні системи з одночасною побудовою та неоднотимним записом (телевізійні та оптико-електронні)
 7. Типи авіаційних та космічних оптико-електронних знімальних систем
 8. Знімальні системи з неоднотимною побудовою та неоднотимним записом (сканувальні)
 9. Радіохвильові знімальні системи
- Перспективні напрями розвитку аерокосмічних знімальних систем
Список літератури