

В.П. Кабашников¹, В.Н. Кузьмин², А. Петручук³,
П. Соболевский³, А.П. Чайковский¹

Выявление источников аэрозольного загрязнения атмосферы на основе данных дистанционного зондирования и статистики обратных траекторий

¹Институт физики, НАН Беларуси,

²Республиканский научно-технический центр ЭКОМИР, г. Минск, Беларусь

³Институт геофизики, г. Варшава, Польша

Поступила в редакцию 2.05.2007 г.

Представлены результаты измерений содержания аэрозолей в вертикальном столбе атмосферы в Минске (Беларусь) и Бельске (Польша) с помощью многоволнового аэрозольного лидара и солнечного сканирующего спектрального радиометра. Рассчитаны трехмерные пятидневные обратные траектории с использованием предоставленных Республиканским гидрометеоцентром Республики Беларусь данных о полях ветра, которые были дополнены данными по вертикальной компоненте скорости ветра и данными о поле ветра в атмосферном пограничном слое.

С помощью метода времени пребывания обнаружено, что самые мощные источники аэрозоля находятся вне территорий Польши и Беларуси (на юго-восточном, южном и юго-западном направлениях от станций мониторинга). Распределение выявленных источников близко к данным ЕМЕР по источникам эмиссии аэрозолей. В среднем южные территории более всего влияют на состояние атмосферы в пунктах контроля. Приблизительно 60% аэрозолей в Минске и около половины аэрозолей в Бельске имеют трансграничное происхождение.

Введение

Атмосферный аэрозоль является одним из важных факторов, определяющих экологическую обстановку в регионе. В результате крупномасштабного ветрового переноса значительный вклад в загрязнение атмосферы взвешенными частицами, наряду с местными источниками, могут вносить удаленные источники аэрозолей. Местонахождение и параметры источников аэрозольного загрязнения часто неизвестны. Особенно это касается источников естественного аэрозоля, а также источников на территориях других стран.

Для нахождения областей, являющихся стационарными источниками переносимой по воздуху примеси, в настоящее время широко используются так называемый метод времени пребывания (*residence time analysis*), впервые предложенный в работах [1, 2]. Входными данными этого метода являются данные мониторинга содержания примеси за большое время (например, за год или несколько лет) и набор обратных траекторий воздушных масс, приходящих в точку мониторинга в моменты измерения концентрации. Предполагается, что воздушная масса, проходящая на достаточно низкой высоте (в основном, в пределах атмосферного пограничного слоя) над территорией-источником эмиссии, захватывает загрязняющее вещество и несет его дальше, уменьшая концентрацию за счет диффузии, осаждения и химических превращений.

С помощью статистической обработки данных мониторинга и обратных траекторий можно установить корреляционные связи между уровнем концентрации в пункте мониторинга и территориями, над которыми воздушные массы проходили до прихода в точку мониторинга, и выявить таким образом регионы, вызывающие повышенную концентрацию загрязнителей в пункте мониторинга.

В рассматриваемом методе географическая область, над которой проходят обратные траектории, делится сеткой на ячейки. В работах [1, 2] рассчитывалась вероятность прохождения траектории над ячейкой при условии, что в пункте мониторинга регистрируется уровень загрязнения выше среднего. Ячейки с высокой вероятностью отождествлялись с источниками. В последующих работах рассчитывались средняя концентрация [3] в пункте мониторинга или средний логарифм концентрации [4] при условии, что траектория проходит над заданной ячейкой. Ячейки, которым соответствует высокая концентрация, рассматриваются как вероятные источники. В работе [5] предложен метод «перераспределения» концентраций вдоль траектории, который более точно локализует источники. Описанные выше методы использовались для выявления регионов-источников окислов серы [2, 5, 6], окислов азота [6], озона [7], кислотных осадков [8], аэрозолей [4], источников и стоков CO₂ [9] и радиоактивного ⁷Be [10].

В настоящей статье приводятся результаты идентификации регионов-источников аэрозольного загряз-

нения атмосферы в Минске и Бельске (Польша, 80 км от Варшавы), полученные на основе данных дистанционного лидарного и радиометрического мониторинга аэрозоля и статистики обратных траекторий с использованием метода [3]. Данные дистанционных измерений содержат информацию об аэрозоле во всем атмосферном слое и, в частности, в нижней тропосфере, где в основном осуществляется крупномасштабный перенос взвешенных частиц. Они гораздо меньше подвержены влиянию местных источников аэрозоля, чем данные наземных измерений. Поэтому в задаче восстановления крупномасштабного пространственного распределения источников взвешенного вещества данные дистанционных измерений имеют объективное преимущество в сравнении с данными наземных измерений.

Основные соотношения

Пусть $c(l)$ — концентрация загрязняющей компоненты, которая фиксировалась в пункте мониторинга (в рецепторе) в момент прихода l -й траектории, а $\tau_{ij}(l)$ — время пребывания l -й траектории над территорией (i, j) ячейки, i, j нумеруют географические координаты (долготу и широту) центра выделенной ячейки. Каждой ячейке (i, j) поставим в соответствие среднее значение концентрации P_{ij} в рецепторе при условии прохождения траектории над рассматриваемой ячейкой:

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

где N — общее количество обратных траекторий. Концентрация P_{ij} характеризует степень потенциального влияния ячейки на содержание примеси в рецепторе. Фактический вклад, который ячейка в среднем за большое время дает в среднюю концентрацию на рецепторе, характеризуется величиной F_{ij} , являющейся произведением мощности P_{ij} на вероятность W_{ij} нахождения траектории над ячейкой (i, j) :

$$F_{ij} = W_{ij}P_{ij}, \quad (2)$$

где вероятность W_{ij} нахождения траектории в ячейке (i, j) есть время пребывания над ячейкой (i, j) , поделенное на общее время пребывания над всеми регионами, над которыми проходили обратные траектории:

$$W_{ij} = \frac{\sum_{l=1}^N \tau_{ij}(l)}{\sum_{ij} \sum_{l=1}^N \tau_{ij}(l)}. \quad (3)$$

Сумма вкладов всех ячеек дает среднюю концентрацию на рецепторе:

$$\sum_y F_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N c(l). \quad (4)$$

Наибольшая вероятность захвата загрязняющего вещества — на тех высотах, где его концентрация максимальна. Как показывает эксперимент [11–13],

основное количество аэрозолей сосредоточено в нижнем двухкилометровом слое атмосферы, главным образом в пределах атмосферного пограничного слоя (АПС). Кроме того, время жизни аэрозольной частицы ограничено процессами сухого и влажного осаждения. Это обстоятельство (наряду с геометрическим фактором) является причиной малого влияния дальних источников на состояние атмосферы в пункте мониторинга. Чтобы учесть преимущественный захват примеси в АПС, а также ограничить влияние дальних источников, вместо времени пребывания траектории над ячейкой будем использовать эффективное время пребывания, равное времени пребывания, умноженному на весовую функцию:

$$g = \exp(-h/h_B)\exp(-t/t_E), \quad (5)$$

где h и h_B — высота траектории и высота АПС; t и t_E — время движения воздушной массы от ячейки до точки измерения и время жизни аэрозольной частицы.

Высота АПС колеблется от дня к ночи и испытывает сезонные колебания. В соответствии с данными [14] для условий средней полосы Восточной Европы в качестве типичных можно брать следующие высоты АПС: для холодного времени года высоты 700 и 300 м соответственно днем и ночью и высоты 1400 и 500 м соответственно днем и ночью для теплого времени года. Тогда высота верхней границы АПС может быть аппроксимирована следующими выражениями:

$$h_B = 725 + 225a + [325 + 125a]\sin(\pi/12(m-6)), \quad (6)$$

где

$$a = \sin[(2\pi/365)(d-356-19) + 3\pi/2]; \quad (7)$$

m — округленное до часа местное время, указывающее, когда воздушная масса, находившаяся в момент измерения в точке мониторинга, проходила над рассматриваемой ячейкой; d — номер дня, отсчитываемый от начала года. В формуле (7) учтено 19-дневное запаздывание [12] среднесуточной высоты АПС относительно длины светового дня.

Данные мониторинга и обратные траектории

Использовались данные по общему содержанию тонкой и грубой фракций аэрозолей в вертикальном столбе атмосферы, полученные с помощью многоволнового аэрозольного лидара и автоматизированного спектрального сканирующего солнечного фотометра [13] в двух пунктах лидарного мониторинга: Минске и Бельске (Польша). Под тонкой фракцией имеется в виду мелкодисперсный аэрозоль с диаметром частиц, не превышающим 2 мкм. Все частицы большего размера были отнесены к грубой фракции. Учитывался промежуток времени с октября 2004 по декабрь 2006 г. Использовались данные более 700 измерений для Минска и более 900 измерений для Бельска.

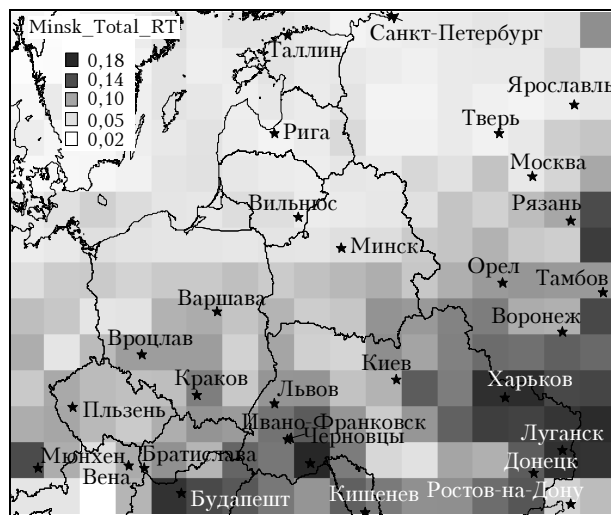
Рассчитывались 5-суточные трехмерные обратные траектории для времен прихода воздушных масс, совпадающих с моментами измерений. Использовались данные о поле горизонтальной составляющей ветра и температуры в Северном полушарии, предоставляемые Республиканским гидрометеоцентром Республики Беларусь. Ветровые поля задавались для 11 уровней по высоте вплоть до уровня 100 гПа, что приблизительно соответствовало высоте 16 км. Горизонтальное разрешение полей ветра и температуры равнялось $2,5 \times 2,5^\circ$. Временное разрешение метеоданных составляло 12 ч. Данные Республиканского гидрометеоцентра были дополнены расчетами вертикальной компоненты скорости ветра по адиабатическим изменениям температуры. Кроме того, с помощью параметризации [15, 16] детализировались поля скоростей внутри АПС.

Поскольку основное количество аэрозолей было сосредоточено в пределах АПС, то данным лидарных измерений ставились в соответствие траектории, приходящие в точку-рецептор на двух высотах: 950 и 850 гПа, что приблизительно соответствует геометрическим высотам 450 и 1350 м. Относительный вклад каждой траектории в наблюдаемое интегральное по высоте содержание примеси полагался пропорциональным эффективному времени пребывания каждой траектории над всеми территориями. Время жизни частиц грубой фракции оценивалось как время падения с высоты 1 км частицы диаметром 10 мкм. Оно оказалось равным 36 ч. Время жизни частиц тонкой фракции определяется вымыванием осадками [17] и в расчетах полагалось равным 7 сут.

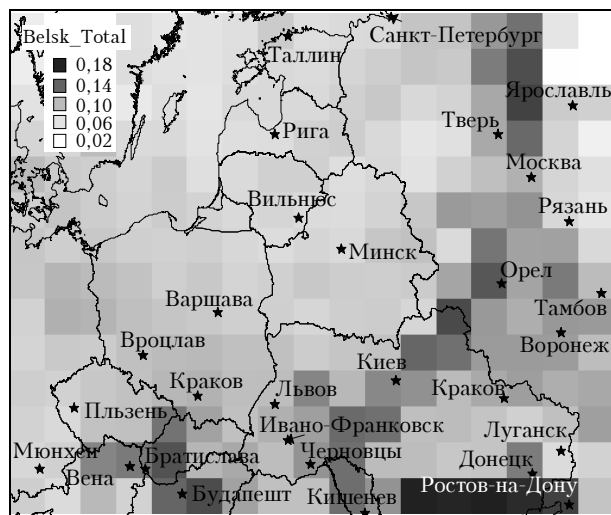
Результаты расчетов

На рис. 1 приведены результаты расчетов по формуле (1) поля концентраций P_{ij} по данным о содержании суммарного мелко- и крупнодисперсного аэрозоля в Минске и Бельске. Ячейки, которым соответствует высокая концентрация, рассматриваются как вероятные источники. Размер ячейки равен 2° по долготе и 1° по широте, что на широте Минска соответствует приблизительно 133 на 100 км.

Для удобства сравнения на всех рисунках представлен один и тот же фрагмент карты. Его размеры определяются условием прохождения над каждой ячейкой не менее 5 траекторий. Видно, что наиболее мощные источники суммарной фракции пыли находятся вне территорий Беларуси и Польши и расположены на юго-западе, юге, юго-востоке и востоке от пунктов мониторинга. Для Минска это юго-восточная граница Украины с Россией, Южное Прикарпатье, Венгрия. Более слабые источники находятся в районе Рязани, российского Черноземья, Киева, юго-востока Германии. По данным для Бельска наиболее сильные источники находятся на юго-восточной границе Украины с Россией. Более слабые источники находятся в районе Твери, на северо-восточной границе Украины с Россией, в Южном Прикарпатье, Молдове, Венгрии, Словакии. Основные источники на территории Беларуси находятся южнее Минска, а в Польше — в ее центральной части и на юге.



а



б

Рис. 1. Пространственная плотность мощности источников суммы мелко- и крупнодисперсного аэрозоля, влияющих на состояние атмосферы в Минске (а) и Бельске (б)

Распределения источников пыли, полученные по данным Минска и Бельска, полностью не совпадают, но имеют некоторые общие черты. Для выяснения степени их количественной близости вычислялась корреляция

$$K_{12} = \sum_{i,j} p_{ij}^{(1)} p_{ij}^{(2)}, \quad (8)$$

где p_{ij} — разность между концентрацией P_{ij} в ячейке (i, j) и средней концентрацией по фрагменту карты; индексы 1 и 2 относятся к различным пунктам мониторинга, а суммирование в (7) ведется по ячейкам на фрагменте карты. Коэффициент корреляции пространственных распределений источников суммарной фракции пыли, представленных на рис. 1, оказался равным 47%. Различия в пространственных распределениях источников могут быть связаны с разными условиями движения воздушных масс от источников к пунктам измерений, с возможно разной потоковой метеорологией для Минска и Бельска, а также

с недостаточной точностью расчета обратных траекторий и с несовершенством метода.

Географическое распределение мощностей источников суммы тонкой и грубой фракций твердых частиц в 2004 г. по экспертным данным ЕМЕР [18, 19] приведено на рис. 2.

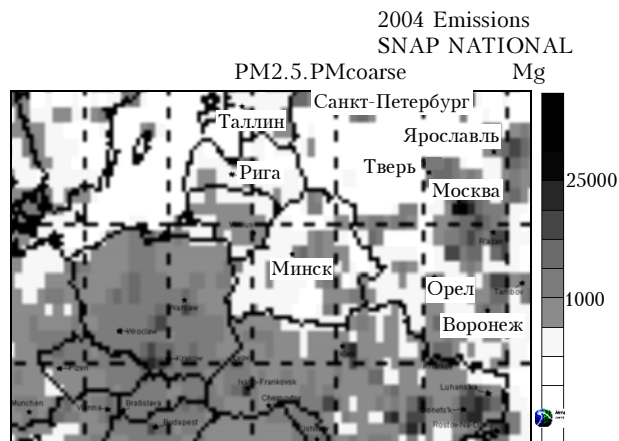


Рис. 2. Пространственное распределение мощности источников эмиссии суммы мелко- и крупнодисперсного аэрозоля по данным ЕМЕР

Видно, что основные источники пыли в пределах региона, вырезаемого картой на рис. 1, расположены на юге и юго-востоке Украины, южнее Карпат, в Молдове, Венгрии, Словакии, на юге и в центре Польши, в районе Москвы, севернее и южнее Москвы, в Черномоземной полосе России. Указанные регионы, в основном, отражены на рис. 1. Наибольшее расхождение наших результатов с данными ЕМЕР имеет место для района Москвы. Наш расчет показывает наличие источников севернее и южнее Москвы, но не локализует ячейку, содержащую Москву, что, по-видимому, связано с неточностью расчетов траекторий. Кроме того, в отличие от данных ЕМЕР, в нашем расчете нет заметных источников в районе Минска. По данным для Минска источник-Минск идентифицируется как ячейка со средней по всем измерениям концентрации. По данным для Бельска обнаруживаются источники рядом с Минском, что, по-видимому, также может объясняться неточностью расчетов траекторий.

Реальное влияние далеких источников имеет место довольно редко: только когда воздушные массы, прибывающие в пункты мониторинга, предварительно проходят над регионами-источниками. В среднем же за время около года или нескольких лет наибольшее (среди территорий одинаковой площади) влияние на состояние атмосферы в пунктах мониторинга оказывают относительно близкие территории в пределах 200–300 км от пунктов мониторинга. Тем не менее суммарное влияние далеких территорий с низкой плотностью функции влияния может быть значительным. Так, отношение вклада территории Беларуси в степень запыленности атмосферы в Минске к вкладу всей территории, покрываемой 5-суточными траекториями, составляет приблизительно 30, 50 и 40% для соответственно тонкой, грубой и суммарной фракций аэрозолей. Отношение вклада территории Польши в степень запыленности атмо-

сферы в Бельске к вкладу всей территории, покрываемой 5-суточными траекториями, составляет приблизительно 42, 61 и 50% для соответственно тонкой, грубой и суммарной фракций аэрозолей. Это значит, что в среднем около 60% пыли в атмосфере Минска и 50% в атмосфере Бельска имеет трансграничное происхождение.

Из таблицы видно, что наибольший вклад в аэрозольную загрязненность атмосферы Минска дают южные и восточные территории, Бельска — южные и западные территории. Менее всего загрязняют атмосферу обоих пунктов мониторинга северные территории.

Относительный вклад (%) территорий, расположенных восточнее, севернее, западнее и южнее Минска/Бельска, в среднегодовую загрязненность аэрозолями атмосферы Минска/Бельска

Фракция аэрозолей	Восток	Север	Запад	Юг
Тонкая и грубая	29/22	17/19	23/26	31/33
Тонкая	32/22	18/18	23/26	27/34
Грубая	25/22	16/21	22/25	37/32

Для оценки статистической достоверности получаемых результатов пространственные распределения источников были также рассчитаны на уменьшенной в два раза базе данных мониторинга, при использовании лишь нечетных номеров измерений. Результаты оказались близкими к представленным на рис. 1.

Корреляция распределений, полученных по полной и уменьшенной базе данных, оказалась равной 94% для Минска и 96% для Бельска, что свидетельствует о достаточности использованной базы данных мониторинга для расчета времен пребывания. Точность локализации источников примеси также связана с точностью расчета траекторий. По данным [20] минимальная погрешность расчета, достижимая только для траекторий, проходящих выше АПС, составляет 20% от пройденного пути. В нашем распоряжении имелись обратные траектории NASA [21] и NILU [22], оканчивающиеся в Минске. Траектории NASA были рассчитаны для времени прихода 0 и 12 ч, а траектории NILU для 0, 6, 12 и 18 ч по Гринвичу. Выясним сначала, насколько поменяются наши результаты при замене траекторий с реальными временами прихода на траектории с временами прихода 0 и 12 ч. Определенный для этих двух типов траекторий коэффициент корреляции пространственных распределений источников оказался равным 81% для суммарной фракции пыли.

Пространственные распределения источников суммарной фракции пыли, полученные с помощью наших траекторий с временами прихода 0 и 12 ч и траекторий NASA и NILU также для времени прихода 0 и 12 ч, характеризуются следующими уровнями корреляции: наши траектории — NASA — 73%; NILU — 77%; NASA—NILU — 74%. На основании приведенных оценок, по-видимому, можно считать, что корреляция между распределениями источников, рассчитанными по модельным и «истинным» траекториям, для рассматриваемого фрагмента карты составляет примерно 75%.

Заклучение

Обработка данных дистанционного мониторинга и данных по обратным траекториям с использованием метода времени пребывания позволила выявить регионы, являющиеся источниками аэрозольного загрязнения атмосферы в Минске и Бельске. Наиболее мощные источники суммарной фракции пыли находятся вне территорий Беларуси и Польши и расположены на юго-западе, юге и юго-востоке от пунктов мониторинга. Эти результаты, в основном, согласуются с экспертными данными ЕМЕП. Наибольший вклад в аэрозольную загрязненность атмосферы Минска дают южные и восточные территории, Бельска — южные и западные территории. В среднем около 60% пыли в атмосфере Минска имеет трансграничное происхождение, а 40% возникает от источников, находящихся на территории Беларуси. На атмосферу Бельска национальные и заграничные источники пыли оказывают примерно одинаковое влияние.

Данные NASA [21] по обратным траекториям воздушных масс были получены Томом Кучерой (Tom Kucsera) в NASA Goddard Space Flight Center, Code 613.3, Greenbelt, MD 20771.

Данные NILU [22] по обратным траекториям воздушных масс были рассчитаны по модели Flextra, разработанной Андреасом Стохлом (Andreas Stohl) (NILU) в сотрудничестве с Герхардом Вотавой (Gerhard Wotawa) и Петрой Сейберт (Petra Seibert) (Institute of Meteorology and Geophysics, Vienna) на основе метеорологических данных, предоставляемых ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecast).

Работа выполнена при частичном финансировании МНТЦ (проект В-1063).

1. *Ashbaugh L.L.* A statistical trajectory technique for determining air pollution source regions // *J. of Air Pollution Control Assessment*. 1983. V. 33. N 12. P. 1096–1098.
2. *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. V. 19. N 7. P. 1263–1270.
3. *Poirot R.L., Wishinski P.R.* Visibility, sulfate and air mass history associated with the summertime aerosol in Northern Vermont // *Atmos. Environ.* 1986. V. 20. N 18. P. 1457–1469.
4. *Seibert P., Kromp-Kolb H., Baltensperger U., Jost D.T., Schwikowski M., Kasper A., Puxbaum H.* Trajectory analysis of aerosol measurements at high alpine sites // *Transport and Transformation of Pollutants in the Troposphere* / Edited by P.M. Borrell, P. Borrell, T. Cvitas, W. Seiler. Academic Publishing, Den Haag. 1994. P. 689–693.
5. *Stohl A.* Trajectory statistics – a new method to establish source-receptor relationship of air pollutants and its applica-

tions to the transport of particulate sulfate in Europe // *Atmos. Environ.* 1996. V. 30. N 4. P. 579–587.

6. *Rúa A., Hernández E., J. de las Parras J., Martín I., Gimeno L.* Sources of SO₂, SO₄²⁻, NO_x, and NO₃ in the Air of Four Spanish Remote Stations // *J. Air and Waste Management Association*. 1998. V. 48. N 7. P. 838–845.
7. *Wotawa G., Kröger H., Stohl A.* Horizontal ozone transport towards the Alps – results from trajectory analyses and photochemical model studies // *Atmos. Environ.* 2000. V. 34. N 7. P. 1367–1377.
8. *Charron A., Plaisance H., Sauvage S., Coddeville P., Gallo J.C., Guillermo R.* A study of the source-receptor relationships influencing the acidity of precipitation collected at a rural site in France // *Atmos. Environ.* 2000. V. 34. N 19. P. 3665–3674.
9. *Apadula F., Gotti A., Pigini A., Longhetto A., Rocchetti F., Cassardo C., Ferrarese S., Forza R.* Localization of source and sink regions of carbon dioxide through the method of the synoptic air trajectory statistics // *Atmos. Environ.* 2003. V. 37. N 18. P. 3757–3770.
10. *Lee L.Y.L., Kwok R.C.W., Cheung Y.P., Yu K.N.* Analyses of airborne ⁷Be concentrations in Hong Kong using back-trajectories // *Atmos. Environ.* 2004. V. 38. N 36. P. 7033–7040.
11. *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. V. 12. N 7. P. 592–599.
12. *Matthias V., Bosenberg J.* EARLINET: A European Aerosol Research Lidar Network to Establish an Aerosol Climatology / Report N 348 of Max-Planck-Institute for Meteorology. Hamburg. September, 2003. 191 p.
13. *Chaikovskiy A., Bril A., Barun V., Dubovik O., Holben B., Thompson A., Goloub Ph., Sobolewski P.* Studying altitude profiles of atmospheric aerosol parameters by combined multi-wavelength lidar and sun sky radiance measurements: Reviewed and revised papers presented at the 22nd International Laser Radar Conference (ILRC 2004), 12–16 July 2004, Matera, Italy. P. 345–348.
14. *Атмосфера: Справочник.* Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 509 с.
15. *Шнайдемман В.А., Беркович Л.В., Фоскарини О.В.* Метод расчета и количественные оценки параметров трехмерной структуры пограничного слоя атмосферы по данным ПГЭП // *Метеорол. и гидрол.* 1987. № 9. С. 98–107.
16. *Businger I.A., Wyngaard I.C., Isume G., Bradley E.F.* Flux profile relationship in the atmospheric surface layer // *J. Atmos. Sci.* 1971. V. 28. N 2. P. 181–189.
17. *Зуев В.Е., Кабанов М.В.* Оптика атмосферного аэрозоля. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 254 с.
18. *Vestring V., Breivik K., Adams M., Wagener A., Goodwin J., Rozovskaya O., Pacyna J. M.* Inventory Review 2005, Emission Data reported to LRTAP Convention and NEC Directive, Initial review of HMs and POPs // Technical report MSC-W 1/2005, ISSN 0804-2446.
19. <http://webdab.emep.int/>
20. *Stohl A.* Computation, accuracy and application trajectories – a review and bibliography // *Atmos. Environ.* 1998. V. 32. N 6. P. 947–966.
21. <http://croc.gsfc.nasa.gov/aeronet/IMAGES>
22. <http://www.nilu.no/trajectories/files/datfiles/datfiles.cfm>

V.P. Kabashnikov, V.N. Kuzmin, A. Pietruczuk, P. Sobolewskii, A.P. Chaikovskii. **Detection of aerosol sources based on remote sounding data and back trajectories statistics.**

Overall aerosol content in the vertical atmosphere column was measured in Minsk (Belarus) and Belsk (Poland) with the help of multiwavelength aerosol lidar and sun-scanning spectral radiometer. 3D five day back trajectories were calculated using delivered by Republican HidroMetCenter of Republic Belarus wind field data which were supplemented with the vertical velocity data and the wind field in atmospheric boundary layer. It was found that the most powerful aerosol source areas are beyond Belarus and Poland territories. They are in south-east, south and south-west directions from monitoring stations. Obtained sources are close to the expert EMEP emission data. On the average, south territories affect mostly on the atmosphere situation at the monitoring sites. About 60% of aerosols in Minsk and about 50% of aerosols in Belsk have a transboundary origin.