

В.П. Кабашников, А.А. Акулинин, В.А. Данилевский,
Д.В. Калининская, Е.Н. Корчемкина, Н.С. Метельская,
Г.П. Милиневский, А.П. Бовчалюк, А. Петручук,
П. Соболевский, А.П. Чайковский

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУТЕЙ ПЕРЕНОСА АТМОСФЕРНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ В ВОСТОЧНОЕВРОПЕЙСКОМ РЕГИОНЕ ПО ДАНЫМ СЕТИ AERONET МЕТОДОМ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА

Типичные пути переноса аэрозолей, регистрируемых на пяти станциях сети AERONET с помощью солнечных фотометров, исследовались с использованием кластерного анализа и метода обратных траекторий. Рассмотрен перенос мелко- и крупнодисперсных частиц в теплое и холодное время года. Выявлены территории, над которыми чаще всего проходят воздушные массы, приносящие в пункты мониторинга аэрозоли с объемным содержанием в столбе атмосферы, превышающим средние значения в 1,5 раза.

Ключевые слова: аэрозоль, атмосфера, перенос, кластерный анализ, обратная траектория.

Введение

Взвешенные в атмосфере частицы – атмосферный аэрозоль – являются существенным фактором, влияющим на энергетический баланс атмосферы Земли и изменения климата [1]. В то же время, аэрозольные частицы, аккумулируя ряд химических веществ, являются одним из основных загрязнителей атмосферы, которые оказывают вредное воздействие на здоровье населения и хозяйственную деятельность. Естественные аэрозоли образуются в результате природных процессов, например, вулканической деятельности, песчаных бурь, лесных пожаров, эрозии земной поверхности, морских штормов и др. Антропогенные аэрозоли возникают в результате деятельности человека. По размерам аэрозольные частицы условно можно разделить на две фракции – мелкодисперсную (частицы с размерами менее 1 мкм) и крупнодисперсную (частицы более 1 мкм).

В результате ветрового переноса значительный вклад в загрязнение атмосферы взвешенными частицами, наряду с местными источниками, могут вносить удаленные источники аэрозолей. В работах [2-3] было предложено проводить анализ процессов крупномасштабного переноса атмосферных примесей, основываясь на данных мониторинга содержания частиц в атмосфере, результатах расчетов обратных траекторий движения воздушных масс и использовании статистического метода кластеризации траекторий. Этот метод является эффективным инструментом для анализа загрязнения атмосферы аэрозолями и определения возможных источников частиц [2-4]. Целью метода обратных траекторий является установление связи между фактом повышенного содержания примеси в районе регистрации и траекторией движения воздушных масс. Таким методом были исследованы типичные пути дальнего переноса ряда атмосферных примесей во многих регионах земного шара [5-11].

Настоящее исследование основывается на подходе, предложенном в работе [3], и предпринято для лучшего понимания типичных путей переноса воздушных масс, приносящих наибольшее количество аэрозолей в пункты мониторинга в Восточноевропейском регионе. Отметим, что для этого региона пути переноса таким способом ранее не исследовались.

Обратные траектории и данные мониторинга

Обратная траектория отображает путь элементарной воздушной массы в моменты времени, предшествующие ее приходу в заданную географическую точку. Другими словами, это траектория воздушной массы в зависимости от обратного отсчета времени. Трехмерные обратные траектории определялись для четырех станций международной сети солнечных фотометров AERONET [12] – Минск (Беларусь), Бельск (Польша), Молдова (Кишинев, Молдова) и Севастополь (Украина) – в соответствии с методом, изложенным в работе [13]. Отметим, что все станции, данные которых использованы в статье, находятся в пределах одноименных городов, за исключением станции "Молдова".

В базе данных AERONET результаты анализа обратных траекторий предоставляют набор траекторий стартующих на восьми уровнях атмосферного давления (950, 850, 700, 500, 400, 300, 250 и 200 гПа) на каждой из станций AERONET. Эти уровни соответствуют высотам над уровнем моря около 0.5, 1.5, 3, 5, 7, 9, 10 и 12 километров соответственно (<http://croc.gsfc.nasa.gov/aeronet>). Отсутствующие в базе данных

AERONET обратные траектории для станции Киев (Украина) были рассчитаны нами по программе [14].

Для расчета траекторий использовались данные о поле ветра и температуры в северном полушарии, предоставляемые Республиканским гидрометеорологическим центром республики Беларусь (<http://hmc.by/>).

Интегральное по высоте объемное содержание взвешенных частиц в столбе атмосферы над местом наблюдений оценивалось на основании значений оптической толщи аэрозолей, полученных по данным измерений с солнечными фотометрами типа CIMEL CE318 сети AERONET [12]. Данные об объемном содержании аэрозолей в столбе атмосферы (ОСА) мелкодисперсных и крупнодисперсных аэрозолей в пяти указанных выше пунктах мониторинга сети AERONET были получены из базы данных http://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/index.html. Используемые в этой базе данных единицы $\text{мкм}^3/\text{мкм}^2$ определяют объем всех аэрозольных частиц, содержащихся в вертикальном столбе атмосферы с сечением 1 мкм^2 . При этом были вычислены средние значения ОСА отдельно для двух периодов года: для теплого периода, которым считается период с апреля по сентябрь включительно, и холодного периода (период в 6 месяцев с октября по март включительно) для всего периода мониторинга на станциях наблюдений. Для анализа использовались обратные траектории лишь для тех дней, в течение которых значения ОСА в месте наблюдений превышали средние за соответствующий сезон не меньше, чем в 1,5 раза.

В настоящее время в литературе нет единого мнения относительно выбора высоты траектории, достаточно хорошо описывающей перенос примесей. Используют траектории, приходящие в пункт мониторинга вблизи поверхности Земли, на высоте 1000 гПа [3], и на высоте 700 гПа (около 3 км над уровнем моря) [10]. Как свидетельствуют лидарные данные [15-17], основное количество частиц содержится в пограничном слое атмосферы на высотах менее 1,5 км. Однако центр тяжести высотных профилей содержания частиц, как правило, находится еще несколько ниже. Поэтому в настоящей работе было принято, что крупномасштабное перемещение атмосферных аэрозольных масс, находящихся в пограничном слое атмосферы, можно проследить с помощью обратных траекторий, стартующих на высоте 950 гПа, что соответствует высоте около 0,5 км над уровнем моря. Отметим также, что результаты качественно не изменятся, если использовать траектории на высоте 850 гПа.

Кластеризация траекторий

В данной работе для исследования типичных путей поступления загрязненного аэрозолями воздуха в пункт мониторинга все «грязные» обратные траектории двухсуточной длительности были разбиты на 5 групп близких между собой траекторий или кластеров, и найдена средняя для каждого кластера траектория. Под названием «грязные» траектории имеются в виду траектории, по которым в пункт мониторинга приходили воздушные массы с значениями ОСА, превышающими типичное среднее значение объемного содержания аэрозолей в столбе атмосферы в полтора раза. При вычислениях использовался метод кластеризации K-mean [18]. Первый шаг в кластерном анализе состоит в расчете расстояний между траекториями. В качестве расстояния между двумя траекториями использовалось значение, равное корню квадратному из суммы квадратов расстояний между точками сравниваемых траекторий с одинаковым числом временных шагов от пункта мониторинга – рецептора. В рассматриваемом методе кластеризации каждая траектория приписывается одному из кластеров. Метод кластеризации K-mean рассчитывает внутрикластерные отклонения траекторий от среднекластерной траектории. Перемещением траекторий из кластера в кластер добиваются минимизации суммы внутрикластерных отклонений по всем кластерам. Для расчетов использовалась стандартная подпрограмма кластеризации из библиотеки Compaq Visual Fortran 6 [19].

В литературе известна только одна попытка [3] ответить на вопрос, какое количество кластеров при кластеризации траекторий можно считать оптимальным. В статье [3] определение оптимального числа кластеров основано на зависимости от числа кластеров скорости изменения усредненного по кластерам среднеквадратичного отклонения отдельных траекторий от среднекластерной траектории $V(n)$:

$$V(n) = \frac{2(R(n) - R(n-1))}{R(n) + R(n-1)}, \quad (1)$$

Где $R(n)$ – усредненное по n кластерам среднеквадратичное отклонение траекторий от среднекластерной траектории в зависимости от числа кластеров n . С увеличением числа кластеров указанная скорость (1) в среднем уменьшается, хотя возможно ее локальное увеличение. Пользователь задает максимально допустимое значение скорости V_{max} . И то значение n , при котором скорость (1) впервые становится меньше V_{max} ,

считается оптимальным числом кластеров. Для всех пунктов мониторинга нами было выбрано одно и то же число кластеров, равное 5. Оно соответствует V_{max} , заключенному в пределах 5-7% [3, 10].

Ниже приведены результаты анализа переноса аэрозолей для каждой из указанных выше станций мониторинга.

Результаты измерений и расчетов и их обсуждение

Траектории движения загрязненных аэрозолями воздушных масс, поступавших на станции мониторинга в 2004-2011 годах на высоте 950 гПа со значениями объемного содержания аэрозольных частиц в столбе атмосферы, превышающими средние сезонные значения в 1,5 и более раз, представлены на рис. 1-5 тонкими линиями.

Данные, приведенные для станций Бельск, Молдова, Минск относятся к 2004–2011 годам. На станции Киев наблюдения начались в 2008 году, а на станции Севастополь – с 2006 года. Данные по этим станциям охватывают весь период с начала наблюдений и до 2011 года включительно. Среднекластерные траектории на рисунках изображены жирными линиями.

На рис. 1 приведены траектории движения загрязненных воздушных масс, поступавших на станцию **Бельск** (широта 51.84°N , долгота 20.79°E , высота 190 метров над уровнем моря) в 2004-2011 годах на высоте 950 гПа со значениями ОСА, превышающими средние сезонные значения в 1,5 и более раз. По данным станции Бельск среднее по всем измерениям объемное содержание крупнодисперсных частиц в столбе атмосферы равно $0,029 \text{ мкм}^3/\text{мкм}^2$ в холодный период и $0,031 \text{ мкм}^3/\text{мкм}^2$ в теплый. Среднее объемное содержание мелкодисперсных частиц равно $0,029 \text{ мкм}^3/\text{мкм}^2$ в холодный период и $0,030 \text{ мкм}^3/\text{мкм}^2$ в теплый. Таким образом, среднее объемное содержание и мелкодисперсных, и крупнодисперсных частиц над станцией Бельск примерно одинаковое круглогодично.

На рис. 1, а-б (холодный период) приведены 176 траекторий со средним объемным содержанием крупнодисперсных частиц $0,14 \text{ мкм}^3/\text{мкм}^2$ (рис. 1, а) и 322 траектории со средним объемным содержанием $0,070 \text{ мкм}^3/\text{мкм}^2$ (рис. 1, б) мелкодисперсных частиц.

значения ОСА крупнодисперсной фракции частиц в 2 раза выше, чем в теплый, и равны 0,200 и 0,090 соответственно. Наибольшие значения ОСА мелкодисперсных частиц связаны с ближайшей к Минску восточной среднекластерной траекторией и составляют в среднем 0,083 в холодный период и 0,082 в теплый.

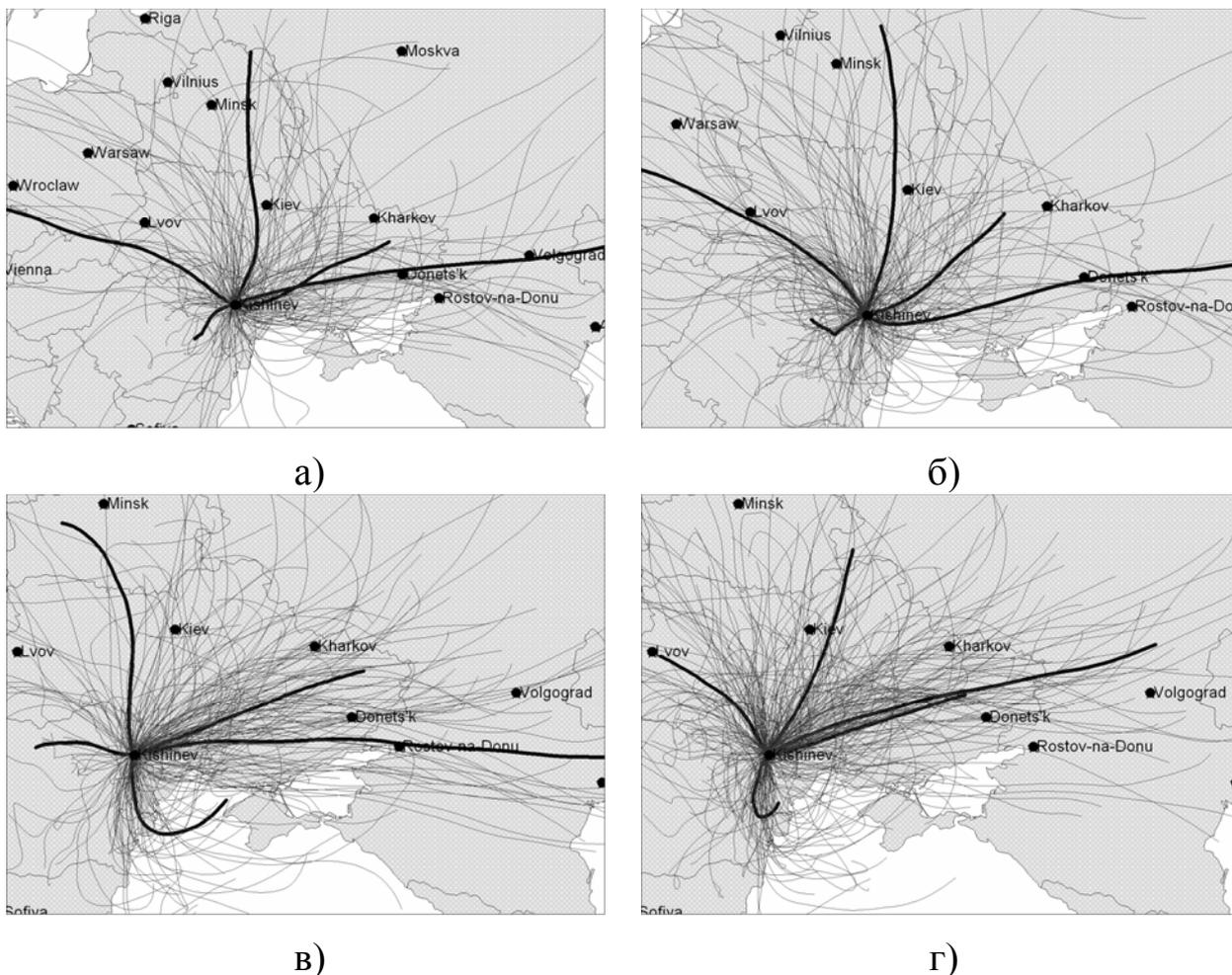


Рис. 2. Обратные траектории движения загрязненных воздушных масс, поступавших на ст. Молдова в 2004-2006 и 2009-2011 гг.: (а, б, в, г) – то же, что и на рис. 1

Над станцией **Молдова** (47.00°N, 28.82°E, 205 метров) в Кишиневе среднее по всем измерениям объемное содержание крупнодисперсных частиц равно 0,019 в холодный период и 0,039 в теплый. Среднее объемное содержание мелкодисперсных частиц равно 0,027 в холодный период и 0,036 в теплый.

На рис. 2, а-б (холодный период года) приведено 368 траекторий со средним объемным содержанием крупнодисперсных частиц 0,065 (рис. 2, а) и 357 траекторий со средним объемным содержанием

мелкодисперсных частиц 0,062 (рис. 2, б). На рис. 2, в-г (теплый период) изображено 443 траекторий со средним объемным содержанием 0,094 крупнодисперсных частиц (рис. 2, в) и 530 траекторий со средним объемным содержанием 0,074 мелкодисперсных частиц (рис. 2, г).

В Кишиневе в теплый период года общее объемное содержание крупно- и мелкодисперсных частиц в вертикальном столбе атмосферы выше, чем в холодный. В целом, основные эпизоды повышения объемного содержания частиц связаны с переносом с северо-западного, северного, северо-восточного и восточного направлений. В летнее время основные направления переноса сдвигаются по часовой стрелке относительно зимнего распределения. Большую роль играет перенос из промышленных районов юго-восточной Украины и Кубани.

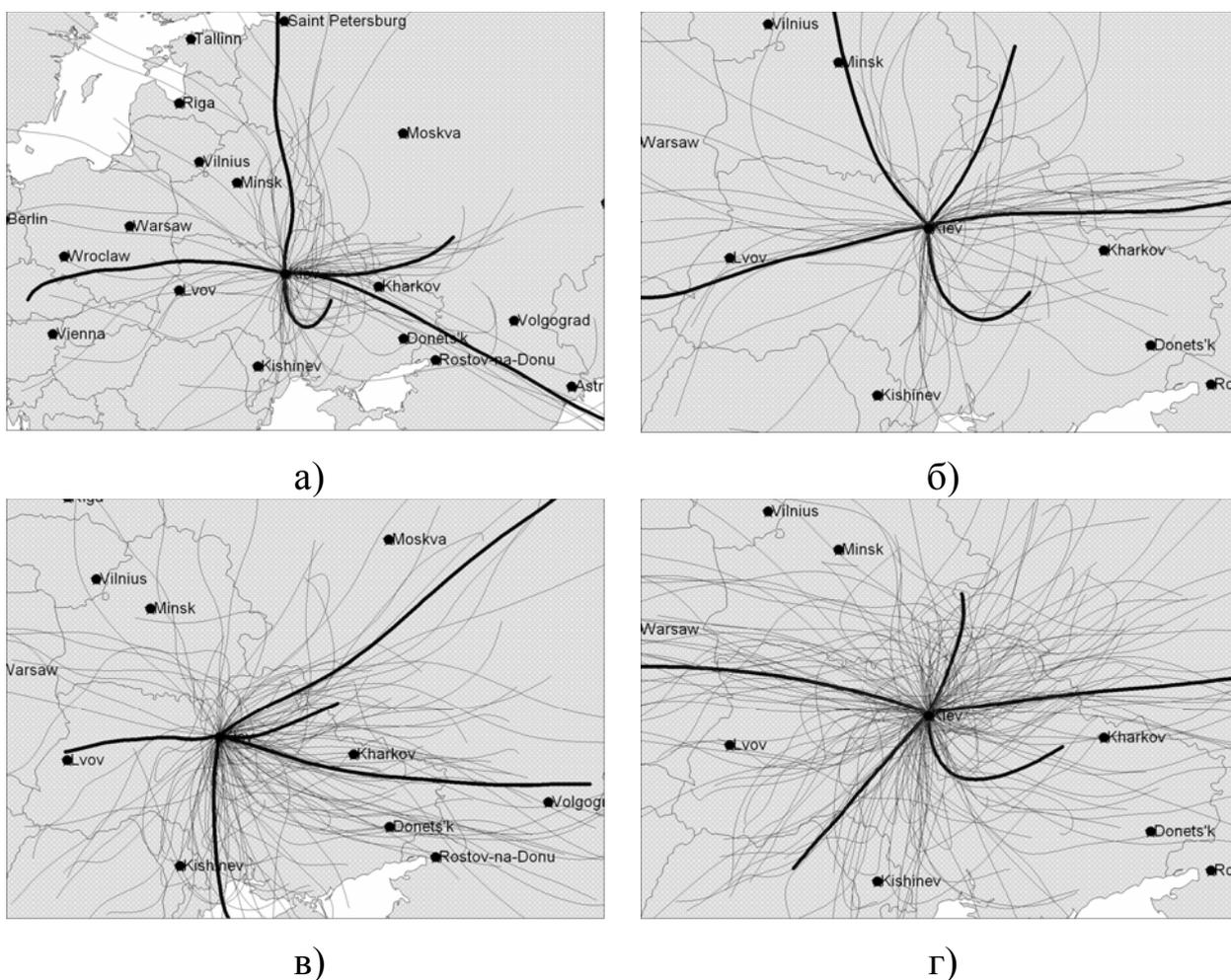


Рис. 3. Траектории движения загрязненных воздушных масс, поступавших на ст. Киев в 2008-2011 гг. на высоте 950 гПа со значениями ОСА, превышающими средние сезонные значения в 1,5 и более раз: (а, б, в, г) – то же, что и на рис. 1

Наибольшие значения объемного содержания крупнодисперсных частиц над станцией Молдова в Кишиневе связаны с северо-западной среднекластерной траекторией в холодный период года и восточной среднекластерной траекторией в теплый и составляют в среднем 0,094 и 0,105 соответственно. Наибольшие значения объемного содержания мелкодисперсных частиц связаны со среднекластерными траекториями, проходящими в районе Харькова и Донецка, и составляют в среднем в холодный период 0,065 и 0,077 в теплый.

По данным мониторинга на станции **Киев** (50.45°N, 30.50°E, 200 м) среднее по всем измерениям объемное содержание крупнодисперсных частиц равно 0,021 в холодный период года и 0,043 в теплый. Среднее объемное содержание мелкодисперсных частиц равно 0,027 в холодный период и 0,036 в теплый. На рис. 3, а-б (холодный период) приведено 165 траекторий со средним объемным содержанием крупнодисперсных частиц 0,062 (рис. 3, а) и 165 траекторий со средним объемным содержанием мелкодисперсных частиц 0,067 (3, б). На рис. 3, в-г (теплый период) изображено 282 траектории со средним объемным содержанием крупнодисперсных частиц 0,11 (рис. 3, в) и 363 траекторий со средним объемным содержанием мелкодисперсных частиц 0,076 (рис. 3, г).

В теплое время года в Киеве основные эпизоды повышения среднего объемного содержания крупнодисперсных частиц связаны с переносом с территории Северного Кавказа и из промышленных районов юга Украины. В холодный период поступление крупнодисперсных частиц происходит из районов Харькова, Донецка, юга Украины, Гомеля, Минска, Новополюцка. Возможен также вклад Северного Кавказа, черноземной части России, а также угледобывающих регионов Польши.

Наибольшие значения содержания крупнодисперсных частиц в Киеве связаны с траекторией воздушных масс из районов Донецка и Ростова в холодный период и из района Москвы – в теплый и составляют в среднем 0,107 и 0,218 соответственно.

Мелкодисперсные частицы в холодное время года поступают в узких коридорах. В теплый период мелкодисперсные частицы приносятся в Киев со всех направлений. Основной вклад в эпизоды повышения объемного содержания частиц дают, по-видимому, промышленные районы Украины и территории России к востоку от Киева. Наибольшие значения содержания мелкодисперсных частиц составляют в среднем 0,075 в холодное время года и 0,087 в теплое, и связаны со среднекластерными траекториями, проходящими вблизи Харькова.

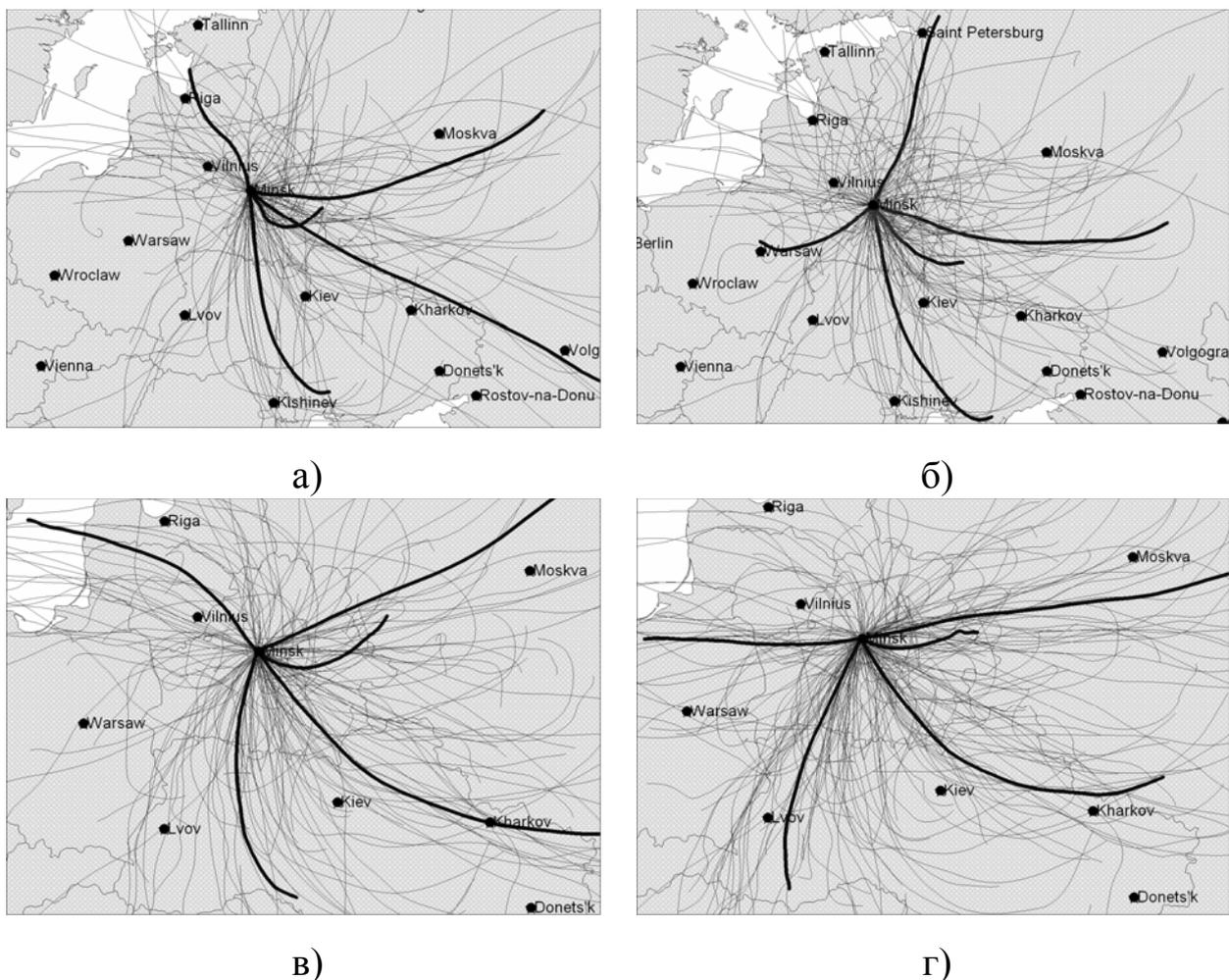


Рис. 4. Траектории движения загрязненных воздушных масс, поступавших на ст. Минск в 2004–2011 гг. на высоте 950 гПа со значениями объемного содержания аэрозолей, превышающими средние сезонные значения в 1.5 и более раз: (а, б, в, г) – то же, что и на рис. 1

На станции AERONET **Минск** (53.92°N , 27.60°E , 200 м) среднее по всем измерениям объемное содержание крупнодисперсных частиц равно 0,026 в холодный период и 0,036 в теплый. Среднее объемное содержание мелкодисперсных частиц равно 0,023 в холодное время года и 0,033 в теплое. На рис. 4, а-б (холодный период) изображено 266 траекторий со средним объемным содержанием 0,090 крупнодисперсных частиц (рис. 4, а) и 319 траекторий (рис. 4, б) со средним объемным содержанием мелкодисперсных частиц 0,066. На рис. 4, в-г (теплый период) приведено 307 траекторий со средним объемным содержанием 0,090 крупнодисперсных частиц (рис. 4, в) и 351 траектория со средним объемным содержанием мелкодисперсных частиц 0,073 (рис. 4, г).

В Минске в теплое время года средние по всем измерениям значения объемного содержания аэрозольных частиц выше, чем в

холодное. Однако средние по эпизодам сильного загрязнения значения ОСА аэрозольных частиц слабо зависят от времен года.

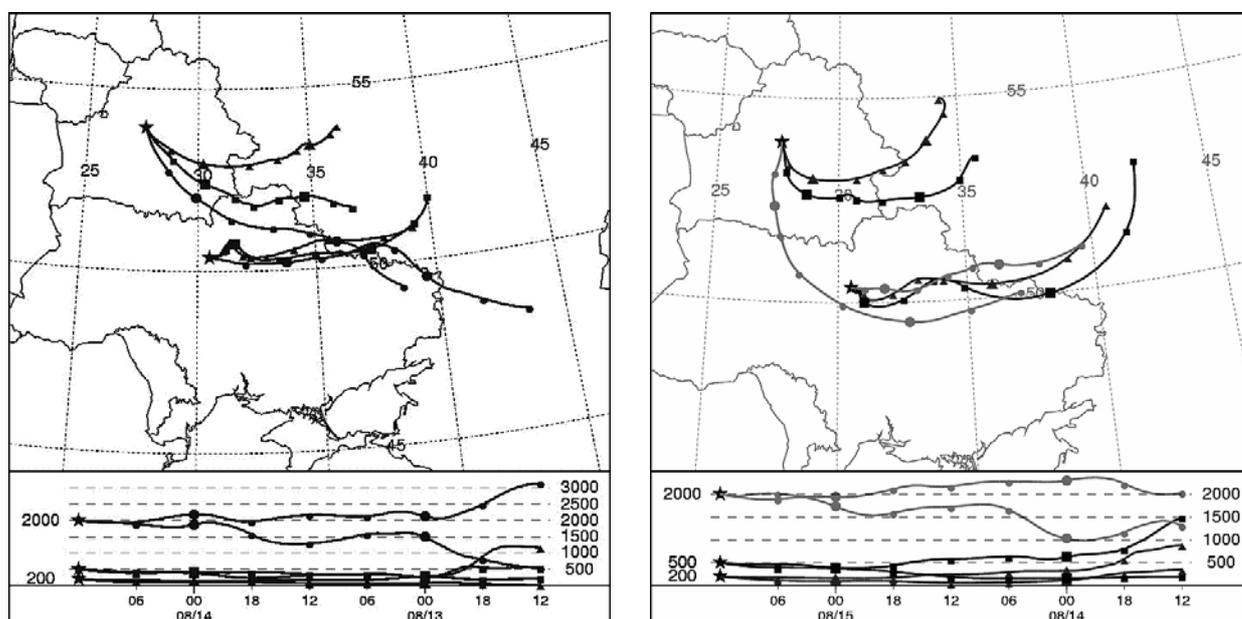


Рис. 5. Обратные траектории переноса аэрозольных частиц в течение 48 часов 14 и 15 августа 2010 г. на высотах 200 м, 500 м и 2000 м над поверхностью Земли, рассчитанные для 12 часов UT для ст. Киев и Минск

Также слабо зависят от времен года пути поступления в Минск воздушных масс, сильно загрязненных крупнодисперсными частицами. В целом, основные эпизоды повышения количества аэрозольных частиц связаны с переносом с востока, юго-востока и юга, с черноземных районов Европейской части России и промышленных районов Украины. Лишь в теплые месяцы в Минск перестает поступать мелкодисперсный аэрозоль с севера, зато появляется дополнительный поток с юго-запада. Наибольшее содержание крупнодисперсных частиц в Минске связано с обобщенной среднекластерной траекторией, проходящей вблизи Вильнюса, и составляет 0,115 в холодное время года и 0,118 – в теплое. Наибольшие значения содержания мелкодисперсных частиц связаны с ближайшей к Москве восточной среднекластерной траекторией и составляют в среднем 0,077 в холодный период и 0,078 в теплый период года.

В августе 2010 г., следует отметить, что вследствие пожаров в лесах и торфяниках, атмосфера в центральной России вокруг г. Москва была значительно загрязнена выбросами аэрозолей продуктов горения. Среднее

значение аэрозольной оптической толщи (АОТ) в этом регионе было в 5-10 раз больше обычного значения в этот период года.

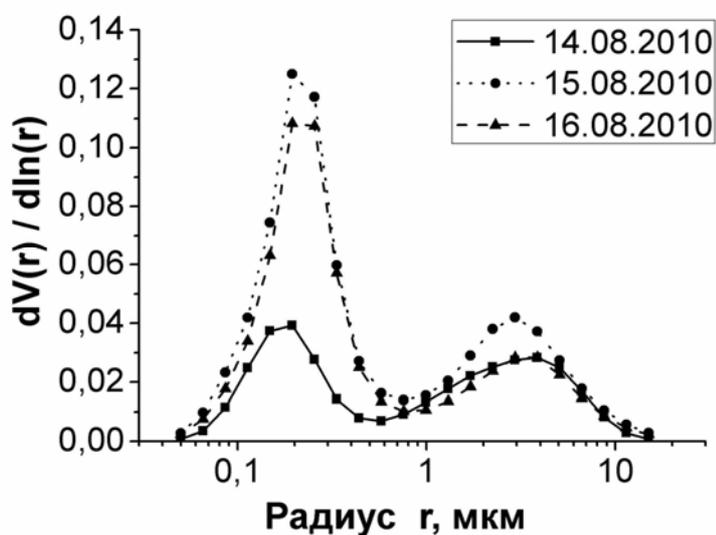


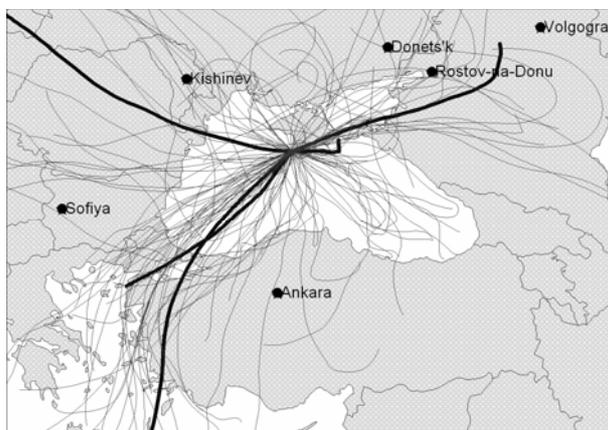
Рис. 6. Объемное распределение частиц по размерам 14-16 августа 2010 года по измерениям на ст. Киев

С 14 по 15 августа 2010 г. на высотах 200 м, 500 м и 2000 м над поверхностью Земли дул восточный ветер, который переносил часть аэрозолей на территорию Украины и Беларуси (рис. 5). В этот период на станциях AERONET Киев и Минск регистрировался локальный максимум АОТ, соответствующий значительному увеличению количества мелкодисперсных аэрозолей в атмосфере. Количество мелкодисперсных частиц 15 августа в Киеве выросло в 3 раза и крупнодисперсных на 1/3 по сравнению с 14 августа 2010 г. (см. рис. 6).

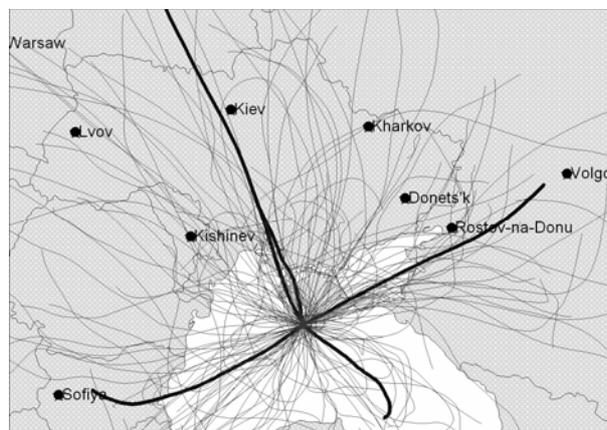
Такая же ситуация сохранялась и 16 августа, но уровень крупнодисперсных аэрозолей стал таким же как 14 августа. Трансграничный перенос частиц в этот период негативно влиял на экологическую ситуацию в восточной и северной части Украины и почти всей Беларуси.

По многолетним наблюдениям на станции **Севастополь** (44.62°N, 33.52°E, 80 м) среднее по всем измерениям значение объемного содержания крупнодисперсных аэрозольных частиц равно 0,023 в холодное время года и 0,042 в теплое. Среднее значение объемного содержания мелкодисперсных частиц составляет 0,021 в холодный период и 0,034 в теплый. На рис. 7, а-б (холодный период) приведены 248 траекторий со средним объемным содержанием

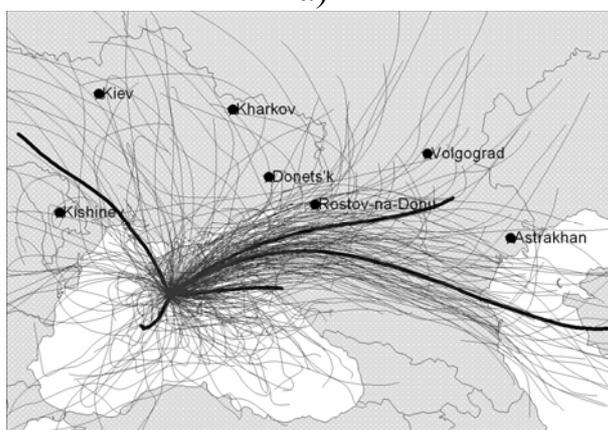
0,082 крупнодисперсных частиц (рис. 7, а) и 327 траекторий со средним объемным содержанием 0,053 мелкодисперсных частиц (рис. 7, б).



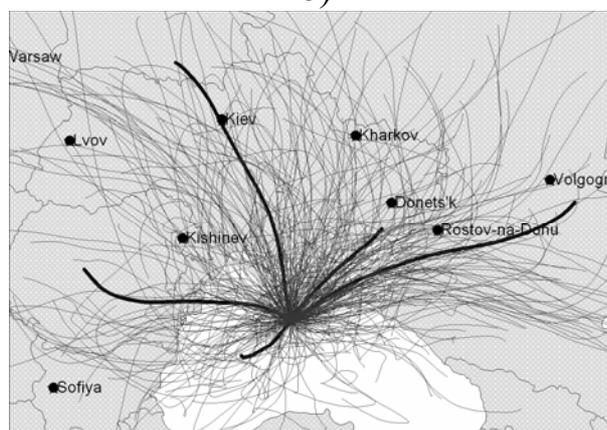
а)



б)



в)



г)

Рис. 7. Обратные траектории движения загрязненных воздушных масс, поступавших на станцию Севастополь в 2007–2011 годах: (а, б, в, г) – то же, что и на рис. 1

На рис. 7, в-г (теплый период) изображены 812 траекторий со средним объемным содержанием 0,096 крупнодисперсных частиц (рис. 7, в) и 798 траекторий со средним объемным содержанием мелкодисперсных частиц 0,071 (рис. 7, г).

В Севастополе общее содержание в вертикальном столбе атмосферы частиц всех размеров в теплое время года выше, чем в холодное. В холодный период поступление крупно- и мелкодисперсных аэрозолей частично связано, по-видимому, с выбросами корабельных двигателей в акватории Черного моря.

В теплое время года основные эпизоды повышения содержания крупнодисперсных частиц связаны с переносом с территории Северного Кавказа. Можно предположить, что это в основном грунтовая пыль во время сельскохозяйственных работ. Мелкодисперсные частицы в холодный период поступают как с моря (возможно, частицы сажи дизельных двигателей морских судов), так и с континента.

В теплый период перенос мелкодисперсных частиц с континента становится преобладающим. Основной вклад в эпизоды повышения колонной концентрации частиц обусловлен переносом с востока и с севера, то есть с Северного Кавказа и из промышленных районов Украины.

Наибольшие значения содержания крупнодисперсных частиц в Севастополе связаны с юго-западной среднекластерной траекторией (трассой на Босфор) в холодное время года и восточной траекторией в теплое и составляют в среднем соответственно 0,096 и 0,104. Наибольшие величины объемного содержания мелкодисперсных частиц связаны со среднекластерными траекториями, проходящими вблизи Софии в холодный период (фактически, это направление с района пролива Босфор) и вблизи Киева в теплый и составляют в среднем соответственно 0,056 и 0,073.

Заключение

Из анализа средних по всем измерениям ОСА следует, что в Киеве, Севастополе и Кишиневе содержание крупнодисперсных частиц в теплое время года превышает их содержание в холодное время приблизительно в два раза. Это может свидетельствовать о вкладе безлесных территорий юго-востока европейской части России и юга Украины в содержание крупнодисперсных частиц. В холодный период подъем пыли с этих территорий уменьшается из-за снежного покрова. Содержание мелкодисперсных частиц в этих пунктах мониторинга также испытывает заметные (до 60 % для станции Севастополь) сезонные изменения, при которых в теплое время года содержание увеличивается. В Минске сезонные изменения содержания крупно- и мелкодисперсных частиц гораздо меньше, чем в указанных выше южных пунктах мониторинга. В Бельске сезонных изменений средних по всем измерениям концентраций вообще не наблюдается. Возможно, это связано с тем, что основным источником частиц в атмосфере Бельска является промышленность.

Основные эпизоды экстремальных повышений объемного содержания аэрозолей в холодное время в Севастополе, по-видимому, связаны с морским транспортом. В теплое время экстремальные повышения концентраций крупнодисперсных частиц связаны с воздушными массами, проходившими над территориями Северного Кавказа. Атмосферные потоки с высокими концентрациями мелкодисперсного аэрозоля поступают как с указанными выше воздушными массами, так и с воздушными массами, приходящими из индустриальных районов Украины.

В Минске основные эпизоды повышения объемного содержания аэрозольных частиц связаны с переносом с востока, юго-востока и юга, с черноземных районов европейской части России и индустриальных районов Украины. В теплые месяцы в Минске перестают значительно повышаться концентрации мелкодисперсного аэрозоля при ветрах с севера, зато появляется дополнительный поток сильно загрязненного аэрозолем воздуха с юго-запада.

В Киеве основные эпизоды повышения объемного содержания аэрозольных частиц связаны с переносом из индустриальных районов юга Украины и с территории Северного Кавказа. В холодное время добавляется также поступление крупнодисперсных частиц с воздушными массами, ранее проходившими над Гомелем, Минском, Новополоцком. Возможен также вклад восточных территорий европейской части России и угледобывающих регионов Польши.

Существенно повлияли на состояние загрязнения атмосферы аэрозолями над наблюдательными станциями Киев, Молдова (Кишинев) и Минск лесные и торфяные пожары в России в июле-августе 2010 г. Среднее значение аэрозольной оптической толщи в этом регионе в августе регистрировалось в 5-10 раз больше обычного значения в этот период года.

В Кишиневе основные зимние эпизоды повышения объемного содержания аэрозольных частиц связаны с переносом с северного сектора направлений. В теплое время основные направления переноса сильно загрязненного частицами воздуха слегка поворачиваются по часовой стрелке относительно распределения в холодный период. Большую роль играет перенос из индустриальных районов юго-восточной Украины и Северного Кавказа.

Пути поступления сильно загрязненного мелкодисперсными частицами воздуха в Бельск слабо зависят от сезона, а концентрация

крупнодисперсного аэрозоля в холодный период в 2 раза выше, чем в теплый. В целом, основные эпизоды значительного повышения объемного содержания аэрозольных частиц связаны с переносом со всех направлений, кроме северного.

В заключение отметим, что типичные пути переноса воздушных масс, приносящих аэрозоли в пункты мониторинга в Восточноевропейском регионе, методами обратных траекторий с применением кластеризации ранее не исследовались. Дальнейшее развитие этих работ будет осуществляться с привлечением данных о параметрах частиц (распределение по размерам, несферичность, показатель преломления), что позволит более точно судить об источниках аэрозолей.

Благодарности

Данные NASA по обратным траекториям воздушных масс были получены Томом Кучерой (Tom Kucsera) в NASA Goddard Space Flight Center, Code 613.3, Greenbelt, MD 20771. Авторы благодарны Бренту Холбену (Brent Holben) – руководителю проекта AERONET и его группе за предоставление данных и поддержку исследований. Работа частично поддержана в рамках проекта No. UKG2-2969-KV-09 ФЦДР (CRDF) США, проектов М/115-2012 и 11БФ051-01-12 МОНмолодьспорт, проекта Ф41/106-2012 Госинформнауки Украины и проекта Ф11К-88 Белорусского Республиканского фонда фундаментальных исследований. Калибровка солнечных фотометров CIMEL была выполнена в центре калибровок AERONET-EUROPE и Лаборатории оптики атмосферы (LOA) при поддержке программы ACTRIS (European Union Seventh Framework Program FP7/2007-2013, грант 262254).

* *

1. *Кондратьев К.Я.* (ред.) Аэрозоль и климат. – Л.: Гидрометеиздат. – 1991. – 541 с.
2. *Samson P.J.* Trajectory Analysis of Summertime Sulfate Concentrations in the Northeastern United States // *Journal of Applied Meteorology*. – 1980. – V. 19. – P. 1382-1394.
3. *Dorling S.R., Davies T.D., Pierce C.E.* Cluster analysis: a technique for estimating the synoptic meteorological controls on air and precipitation chemistry – method and applications // *Atmospheric Environment*. – 1992. – V. 26. – P. 2575-2581.

4. *Aaltonen V., Rodriguez E., Kazadzis S., Arola A., Amiridis V., Lihavainen H., de Leeuw G.* On the variation of aerosol properties over Finland based on the optical columnar measurements // Atmospheric Research. – 2011. – doi:10.1016/j.atmosres.2011.07.014.
5. *Seibert P., Kromp-Kolb H., Baltensperger U., Jost D.T., Schwikowsky M., Kasper A., Puxbaum H.* Trajectory analysis of aerosol measurements at high alpine sites // In Transport and Transformation of Pollutants in the Troposphere (edited by Borrell P.M., Borrell P., Cvitas T. and Seiler W.). – 1994. – Academic Publishing. – Den Haag. – P. 689-693.
6. *Tosittia L., Ricciob A., Sandrinia S., Bratticha E., Baldaccia D., Parmeggiana S., Cristofanellid P., Bonasonid P.* Short-term climatology of PM10 at a high altitude background station in southern Europe // Atmospheric Environment. – 2012. – <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.10.051>.
7. *Cape J.N., Methven J., Hudson L.E.* The use of trajectory cluster analysis to interpret trace gas measurements at Mace Head, Ireland // Atmospheric Environment. – 2000. – V. 34. – P. 3651-3663.
8. *Abdalmogith S.S., Harrison R.M.* The use of trajectory cluster analysis to examine the long-range transport of secondary inorganic aerosol in the UK // Atmospheric Environment. – 2005. – V. 39, No. 35. – P. 6686-6695.
9. *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. – V. 368. – P. 875-883.
10. *Borgea R., Lumbreras J., Vardoulakis S., Kassomenos P., Rodriguez E.* Analysis of long-range transport influences on urban PM10 using two-stage atmospheric trajectory clusters // Atmospheric Environment. – 2007. – V. 41. – P. 4434-4450.
11. *Baker J.* A cluster analysis of long range air transport pathways and associated pollutant concentrations within the UK // Atmos. Environ. – 2010. – V. 44, No.4. – P. 563-571. – doi:10.1016/j.atmosenv.2009.10.030.
12. *Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., Tanré D., Buis J.P., Setzer A., Vermote E., Reagan J.A., Kaufman Y.J., Nakajima T., Lavenu F., Jankowiak I., Smirnov A.* AERONET-A federated instrument network and data archive for aerosol characterization // Remote Sens. Environ. – 1998. – V. 66. – P. 1-16.
13. *Pickering K.E., Thompson A.M., Kim H., DeCaria A.J., Pfister L., Kucsera T.L., Witte J.C., Avery M.A., Blake D.R., Crawford J.H., Heikes B.G., Sachse G.W., Sandholm S.T., Talbot R.W.* Trace gas transport and scavenging in PEM-Tropics B South Pacific Convergence Zone convection // Journal of geophysical research. – 2001. – 106. – P. 32591–32602. – <http://croc.gsfc.nasa.gov/aeronet/IMAGES>.
14. *Бурак Р.Н., Деменцова И.А., Кабашиников В.П., Метельская Н.С.* TRAJECTORY – программа для расчета траекторий движения воздушных

- масс // Система управления экологической безопасностью: сб. тр. IV заочной международной научно-практической конференции, Екатеринбург, 27-28 мая 2010 г.: в 2 т. / Екатеринбург. – 2010. – Т. 2. – С. 127-131.
15. *Balin Yu.S. and 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.
 16. *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.
 17. *Chaikovsky 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.
 18. *Мандель И.Д.* Кластерный анализ. – М.: Финансы и статистика. – 1988. – 176 с.
 19. *Software Product Description* for Compaq Visual Fortran, Version 6. Compaq. – <http://www.compaq.com/fortran/visual/> – 2000. – 13 p.

*Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко,
Институт физики Национальной Академии Наук Беларуси,
Институт прикладной физики Академии Наук Молдовы,
Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Институт геофизики Польской Академии Наук.*

**В.П. Кабашников, О.О. Акулінін, В.О. Данилевський,
Д.В. Калинська, О.М. Корчемкіна, Н.С. Метельська,
Г.П. Міліневський, А.П. Бовчалуок, О. Петручук, П. Соболевський,
О.П. Чайковський**

Дослідження шляхів переносу атмосферних аерозолів у Східноєвропейському регіоні за даними мережі AERONET методом кластерного аналізу

Типові шляхи переносу атмосферних аерозолів, які реєструються на п'яти станціях мережі AERONET за допомогою сонячних фотометрів, досліджувались з використанням кластерного аналізу та методу зворотних траєкторій. Розглянуто перенос дрібно- та крупнодисперсних частинок у теплі та холодні періоди року. Виявлено території, над якими найчастіше проходять повітряні маси, що приносять у пункти моніторингу аерозолі з об'ємним вмістом у стовпі атмосфери, який перевищує середнє значення в 1,5 рази.

Ключові слова: аерозоль, атмосфера, перенос, кластерний аналіз, зворотна траєкторія.

V.P. Kabashnikov, A.A. Aculinin, V.O. Danylevsky, D.V. Kalinskaya, E.M. Korchemkina, N.S. Miatselskaya, G.P. Milinevsky, A.P. Bovchaliuk, A. Pietruczuk, P. Sobolewsky, A.P. Chaikovsky

Atmosphere aerosol transfer in the East European region by AERONET network data using the cluster analysis method

The typical transfer paths of atmospheric aerosol registered at five AERONET network stations equipped by sunphotometer, were investigated by the cluster analysis and back trajectory methods. The transfer of fine- and coarse mode particles is considered in warm and cold times of year. The territories, where the air masses bringing in the monitoring stations the aerosol with by total volume column content exceeded mean values in 1,5 times, were revealed.

Keywords: aerosol, atmosphere, transfer, cluster analysis, back trajectory.