

А.П. Иванов<sup>1</sup>, А.П. Чайковский<sup>1</sup>, Э.П. Зега<sup>1</sup>, В.П. Кабашников<sup>1</sup>,  
С.В. Какарека<sup>2</sup>, В.Л. Катков<sup>3</sup>, А.Н. Красовский<sup>4</sup>, В.М. Попов<sup>1</sup>

## Исследование трансграничного переноса загрязнений в атмосфере в регионе Беларуси

<sup>1</sup>Институт физики им. Б.И. Степанова НАНБ,

<sup>2</sup>Институт проблем использования природных ресурсов и экологии НАНБ,

<sup>3</sup>Объединенный институт проблем информатики НАНБ,

<sup>4</sup>Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы БГУ МО РБ,  
г. Минск, Беларусь

Поступила в редакцию 6.08.2007 г.

Созданы лидарный и радиометрический комплексы для измерения содержания аэрозоля и озона в атмосфере. Разработан алгоритм совместной обработки данных лидаров и солнечных фотометров. Для получения информации в сопредельных регионах использовались данные глобальных и региональных наблюдательных сетей контроля атмосферы. Представлены данные наблюдений озонового слоя в регионе Беларуси. Формирование озоновых аномалий объясняется процессом перемещения «озоновых дыр». Разработана программа расчета трехмерных траекторий движения воздушных масс в свободной атмосфере и атмосферном пограничном слое. Разработанные локальные и межрегиональные модели переноса аэрозолей и газов в масштабах от нескольких десятков до сотен километров адаптированы к условиям Беларуси. Дана оценка влияния крупных промышленных центров на загрязнение территории Беларуси аэрозолями и газами.

Изучение трансграничного и межрегионального переноса загрязняющих веществ в атмосфере вследствие природных явлений и техногенных катастроф и оценка его влияния на экосистемы и климат являются приоритетной задачей охраны окружающей среды. Важным этапом в формировании системы контроля межрегионального переноса в Европе стали работы в рамках Программы ЕМЕП (Совместная программа наблюдений и оценки распространения загрязнителей воздуха на большие расстояния), реализация которой началась в 80-е гг. XX в.

В рамках ЕМЕП осуществляются координированные измерения атмосферных примесей на контрольных станциях. Однако в абсолютном большинстве измерения осуществляются локальными методами в приземном слое и данные набираются за относительно большой промежуток времени. Это не позволяет эффективно контролировать потоки загрязняющих компонентов в атмосфере, поскольку крупномасштабный перенос осуществляется в основном вне приземного слоя. Тем самым затрудняется непосредственное использование результатов измерений для оценки и корректировки расчетов моделей переноса загрязнений.

В настоящее время Европейский Союз формирует программы, направленные на решение задач в области мониторинга крупномасштабного переноса загрязнений, с применением достижений в области дистанционного зондирования атмосферы и выдачей информации в реальном масштабе времени. Именно такой подход реализован в Государственной программе прикладных научных исследований Республики Беларусь «Создание аппаратного комплекса

и методов мониторинга трансграничного и межрегионального переноса загрязнений в атмосфере с использованием дистанционных и локальных измерительных систем» («Трансграничный мониторинг»). В работе принимали участие сотрудники 15 организаций НАН Беларуси, Минобразования, Минприроды. Ниже изложены результаты, полученные в рамках этой программы в 2004–2005 гг.

В ряде случаев для иллюстрации некоторых явлений приводятся данные других лет.

### Аппаратурное и методическое обеспечение измерений

Для натурных исследований процессов крупномасштабного переноса был сформирован аппаратный комплекс дистанционного зондирования атмосферы. В Институте физики НАНБ (ИФ) были созданы панорамная и стационарная многоволновые лидарные системы для зондирования тропосферного аэрозоля, а также лидар для зондирования озона в стратосфере [1]. Интеркалибровка аппаратуры и алгоритмов обработки данных была проведена в рамках Европейской лидарной сети EARLINET [2]. В Национальном научно-исследовательском центре мониторинга озоносферы Белорусского государственного университета был изготовлен прибор для измерения общего содержания озона в атмосфере [3–5]. Для прогнозирования загрязнения воздуха продуктами лесных пожаров привлекались результаты космических наблюдений. При обработке данных лидарных, радиометрических, а также космических наблюдений наряду с известными методиками использовались новые алгоритмы.

## Озон и аэрозоль в верхних слоях атмосферы

Разработан алгоритм оценки вертикального распределения концентраций крупной и мелкой фракций тропосферного аэрозоля на основе данных коррелированного зондирования аэрозольного слоя многоволновым лидаром и солнечным радиометром CIMEL [6, 7]. В априорной модели аэрозоля полагалось, что аэрозоль состоит из двух фракций (крупной и мелкой с границей около 0,5 мкм) с параметрами, совпадающими с модами интегрального по высоте распределения частиц по размерам, восстановленным по данным CIMEL. При этом концентрации аэрозольных фракций могут изменяться с высотой. Формировалась базовая система уравнений, определяющая взаимосвязь измеренных оптических сигналов и параметров аэрозольного слоя и включающая: лидарные уравнения для всех рабочих длин волн; уравнения для интегральных по слою фотометрических величин (спектральная оптическая толщина или интеграл по высоте концентрации мелкой и крупной фракций и т.д.); ограничения на гладкость профилей концентраций аэрозольных фракций. Строилась функция правдоподобия для модели, а затем находились высотные профили концентраций мелкой и крупной фракций, которые обеспечивали максимум функции правдоподобия.

Предложен алгоритм, позволяющий с помощью разделения вкладов от различных участков поверхности Земли в регистрируемое излучение детектировать малые пожары и оценивать их площадь в пикселе при наличии фактора ложной тревоги (облака или блика от водной поверхности). Алгоритм использует локальную априорную информацию о спектральном поведении откликов от различных составляющих пикселя, а также параметры текущего состояния поверхности и атмосферы (температура, влажность, метеорологическая дальность видимости и пр.). В результате вероятность обнаружения пожаров повысилась с 60 до 80%. Разработаны методика и алгоритмы, а также программные средства, позволяющие повысить точность определения координат обнаруженных температурных аномалий.

Изучение трансграничного переноса, в дополнение к данным о состоянии атмосферы Беларуси, требует использования аналогичных данных в сопредельных регионах. С 2000 г. в Европе регулярные измерения параметров аэрозоля осуществляются лидарной сетью EARLINET [2]. В настоящее время сеть включает более 20 станций в Европе, в том числе лидарную станцию Института физики НАН Беларуси. С 2005 г. в СНГ проводятся координированные наблюдения лидарной сетью CIS-LiNet [1].

Одной из важных целей формирования CIS-LiNet является организация координированных лидарных наблюдений на пространстве Евразийского континента посредством интеграции EARLINET, CIS-LiNet и Восточно-Азиатской лидарной сети (AD-Net) [8].

Детальные исследования параметров аэрозоля посредством солнечных сканирующих радиометров CIMEL проводятся в рамках мировой сети AERONET (рис. 1), а содержания озона разными методами — в сети NDSC.

Результаты наблюдений отмеченных выше сетей мониторинга атмосферы использовались при решении задач программы «Трансграничный мониторинг».

Озон является одной из самых изменчивых составляющих земной атмосферы. Общее содержание озона (ОСО) в атмосфере над каждым конкретным регионом определяется фотохимическими процессами его образования и разрушения в верхней стратосфере и процессами переноса озона воздушными массами в более низких слоях. В средних и высоких широтах большая часть озона аккумулируется в нижней и средней стратосфере, т.е. на тех высотах, где значительную роль в озоновом бюджете играют процессы переноса. Поэтому фактор крупномасштабного переноса озона вместе с воздушными массами играет значительную роль в формировании ОСО над территорией республики в течение всех сезонов года.

Общая картина изменения ОСО в Беларуси за последние годы по данным лидарных измерений, спутниковых данных (TOMS, [http://toms.gsfc.nasa.gov/teacher/ozone\\_overhead.html](http://toms.gsfc.nasa.gov/teacher/ozone_overhead.html)) и результатов измерений Национального научно-исследовательского центра мониторинга озоносферы (ННИЦМО) (<http://www.fm.basnet.by/ru/index.htm>) представлена на рис. 2. Величина ОСО менялась в диапазоне 220–450 е.Д.

Оценки ОСО, полученные по результатам измерения лидаром и TOMS, характеризуются коэффициентом корреляции, равным 0,8. Следует отметить частое появление отрицательных озоновых аномалий — явления, представляющего собой резкое, кратковременное и значительное по величине уменьшение ОСО в локальной области атмосферы. Пример перемещения таких аномальных зон показан на рис. 3.

Озоновые аномалии формируются в основном в Северной Атлантике и попадают в регион Европы за счет переноса этих локальных областей с избытком или недостатком озона воздушными массами. Области с дефицитом ОСО передвигаются на восток, изменяя при этом форму и размеры. Глубина аномалий сначала увеличивается, а затем уменьшается и исчезает. Большей частью над Беларусью располагаются аномалии в завершающей стадии. Дефицит ОСО при этом составляет 20–30%.

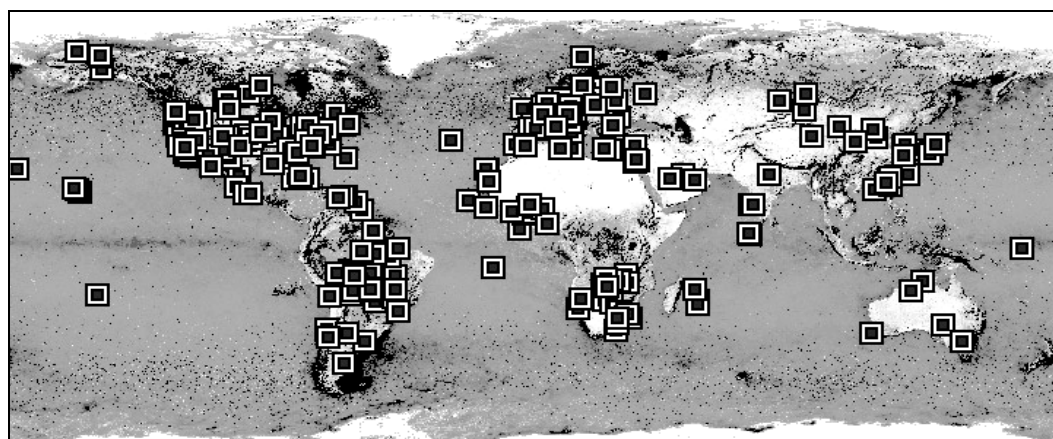
Мониторинг аэрозоля в верхней тропосфере и стратосфере осуществлялся одновременно с измерениями профилей концентрации озона. Основным информационным источником для восстановления параметров аэрозоля являлся канал 532 нм.

По результатам лидарного зондирования были восстановлены высотные профили показателя обратного аэрозольного рассеяния  $\beta_a(h)$ . Основными источниками аэрозольного вещества в стратосфере являются тропосферно-стратосферный обмен и мощные вулканические извержения, выбросы которых могут «пробить» тропопаузу и доставить вещество в стратосферный слой. Крупные вулканические извержения оказывают мощное импульсное воздействие на стратосферный аэрозольный слой. В дальнейшем посредством механизмов тропосферно-стратосферного обмена стратосферный слой возвращается в равновесное (фоновое) состояние.

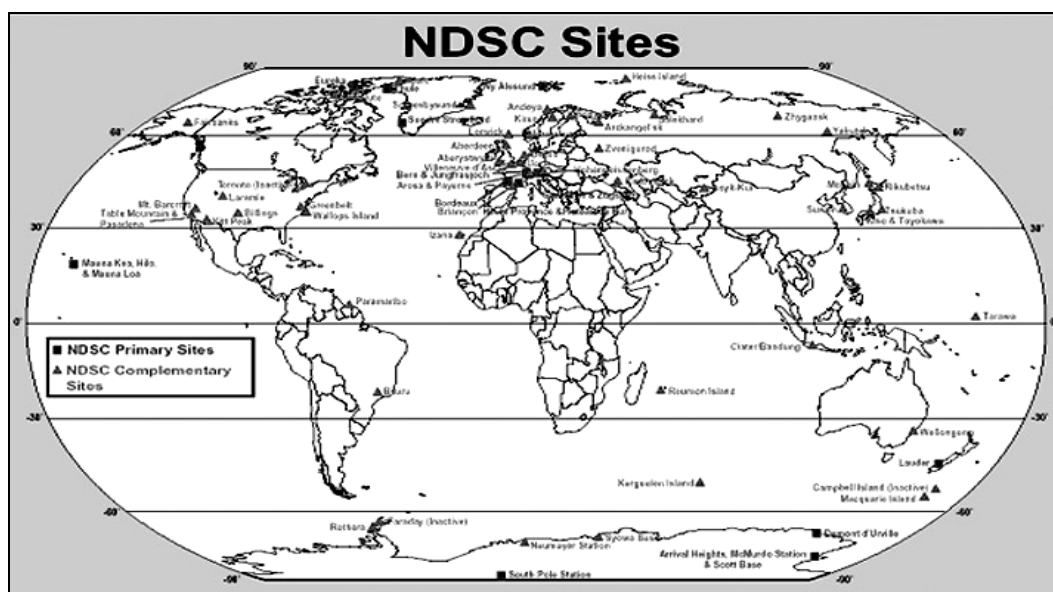


\* – EARLINET, O – CIS-LiNet и ■ – AD-Net

a



b



c

Рис. 1. Мировые сети контроля состояния атмосферы: *a* – лидарные сети Европы, стран СНГ и Восточной Азии; *б* – мировая фотометрическая сеть AERONET, предназначенная для контроля спектральной прозрачности атмосферы и состава аэрозоля; *в* – озонметрическая сеть NDSC

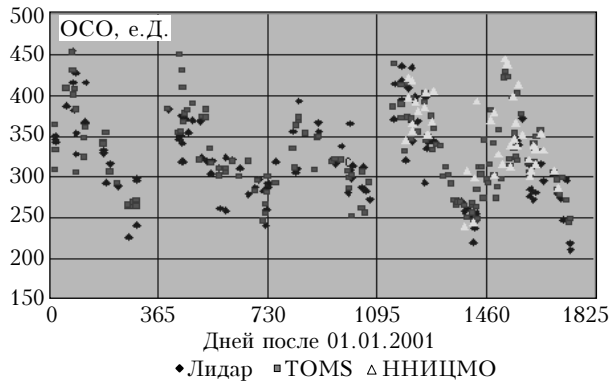
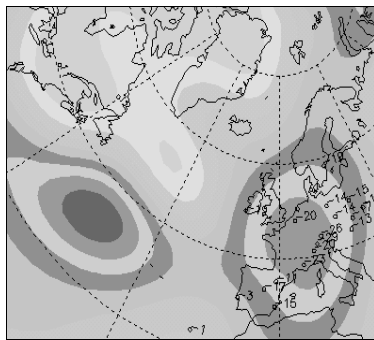
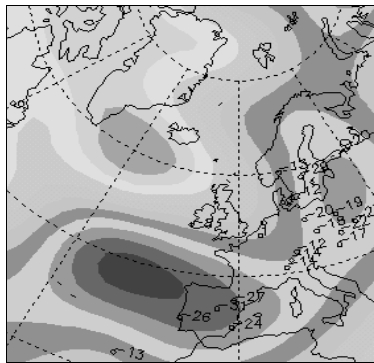


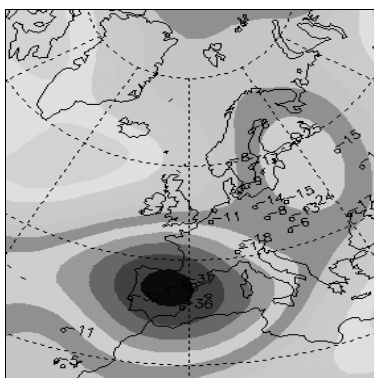
Рис. 2. Трансформация ОСО по данным измерений лидара, TOMS, ННИЦМО



07.01.04



09.01.04



10.01.04

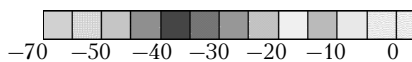


Рис. 3. Отрицательная озоновая аномалия 07–10.01.04 г. (показано отклонение от многолетнего среднего содержания озона)

Последним наиболее мощным за время наблюдений вулканическим извержением был взрыв вулкана Пинатубо 15–16 июня 1991 г. В результате извержения в атмосферу было выброшено огромное количество газов и аэрозоля. По оценке, сделанной на основании спутниковых наблюдений [9], масса инжектированной двуокиси серы составила порядка 20 Мт, что в 3 раза превышает величину выбросов SO<sub>2</sub> в результате предшествующего мощного извержения вулкана Эль-Чичон в 1982 г. В стратосфере это привело к образованию мощных аэрозольных облаков, состоящих из капель водного раствора серной кислоты, общей массой 20–30 Мт [10]. Тем самым был прерван период пребывания стратосферного аэрозольного слоя в состоянии, близком к фоновому. С этого времени начался процесс формирования стратосферных аэрозольных облаков и их последующая диссипация.

На рис. 4 представлена временная трансформация интегрального показателя обратного аэрозольного рассеяния стратосферного слоя  $B = \int_{h_1}^{h_2} \beta_a(h') dh'$

в регионе Минска за период от извержения вулкана Пинатубо до конца 2005 г.

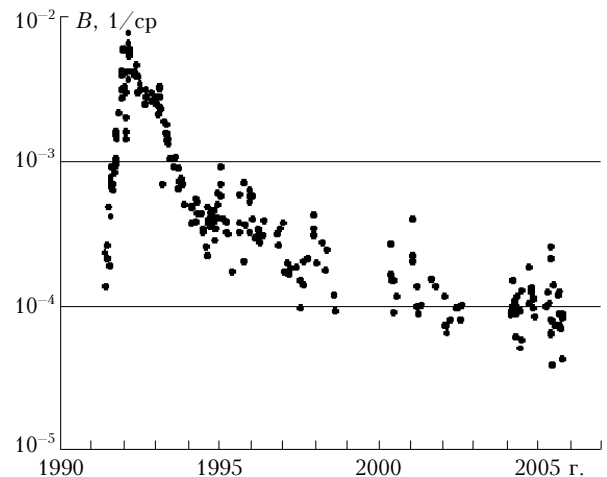


Рис. 4. Временная трансформация интегрального показателя обратного аэрозольного рассеяния в стратосфере (выше 13 км) на длине волны 532 нм в регионе Беларуси за период 1990–2005 гг.

Из этих данных следует, что интегральный параметр  $B$  после извержения Пинатубо за время около полугода вырос на два порядка. Последующий процесс релаксации характеризуется двумя временными масштабами [11]. Первый, характерный для периода 1992–1994 гг. и обусловленный удалением крупнодисперсной фракции, имел длительность 280 дней. Второй, с 1995 г., – около 730 дней.

В настоящее время среднее значение параметра  $B$  составляет примерно 0,0001 1/ср. Динамика изменений параметра  $B$  за последние годы дает основания полагать, что его величина в дальнейшем будет стабилизироваться вблизи этого уровня. Сегодня содержание аэрозольного вещества в стратосфере минимально с 70–80-х гг., когда начались регулярные

лидарные наблюдения стратосферы. Таким образом, не подтвердились высказывавшиеся в научной литературе опасения о значительном росте фонового уровня стратосферного аэрозольного вещества в результате антропогенного загрязнения и прогнозы существенного влияния этого механизма на радиационные процессы в атмосфере и возможные климатические последствия.

Измерения показывают, что величина показателя аэрозольного рассеяния, который можно считать пропорциональным массовому содержанию аэрозоля, уменьшается с высотой в интервале 10–30 км по закону, близкому к экспоненциальному.

### Аэрозольное загрязнение, обусловленное аномальными природными явлениями

Измерения в рамках сети EARLINET показывают, что результатом пылевых бурь в северной части Африки, прежде всего в пустыне Сахара, а также на Аравийском полуострове являются систематические выносы пылевых частиц не только в южные, но и в центральные и северные регионы Европы, в том числе в Беларусь. В течение года число зарегистрированных в регионе Беларуси существенных эпизодов выноса пыли составляет 8–10. Перенос пыли осуществляется преимущественно на высотах 3–7 км. Оработанная процедура наблюдений включает анализ результатов расчетов по прогнозным моделям NAAPS, SKIRIN, DREAM и проведение специальной серии натурных лидарных и радиометрических измерений на станциях EARLINET и CIS-LiNet.

Эффективным методом диагностики пылевых частиц в атмосфере является поляризационное зондирование. Степень деполяризации обратного рассеяния пылевыми частицами составляет примерно 0,1–0,2.

Максимальная степень загрязнения атмосферы пылевыми частицами вследствие их выноса из пустыни Сахара в Беларусь наблюдалась в начале августа 2001 г., когда оптическая толщина пылевых частиц достигла уровня 0,6 на длине волны 532 нм.

В летний сезон в регионе Беларуси одним из основных источников загрязнения атмосферы являются лесные и торфяные пожары в западных районах России, в Украине и Беларуси. Лидарные и радиометрические измерения позволяют обнаруживать и детально анализировать распространение дымов. Наиболее сильное дымовое загрязнение в г. Минске наблюдалось в сентябре 2002 г. (рис. 5).

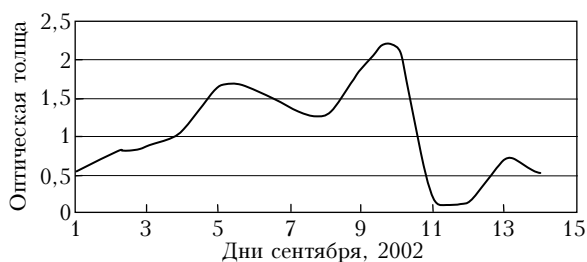


Рис. 5. Аэрозольная оптическая толщина атмосферы в первой половине сентября на длине волны 440 нм

Видно, что в начале месяца мутность воздуха нарастала, достигала максимума 10 сентября, а в последующие два дня воздух стал очень чистым. Лидарные измерения показали, что смог поднимался до высоты 1–1,5 км. Данные радиометра CIMEL свидетельствовали о наличии большого количества мелкодисперсной непоглощающей аэрозольной фракции в дни смога. Это свидетельствовало о том, что основным источником загрязнения были пожары в стадии тления. Рассчитанные траектории переноса воздушных масс показывали, что основные источники загрязнения для г. Минска находились на территории Беларуси. Одиннадцатого сентября потоки воздуха из Арктических районов с больших высот опустились в Беларусь в приземные слои и вытеснили смог.

### Загрязнения, обусловленные антропогенной деятельностью

Антропогенное загрязнение является важным фактором, определяющим качество воздуха в регионе Беларуси [6, 7, 12, 13]. Исследование воздействия крупномасштабного переноса на характеристики аэрозоля в Европейском регионе было проведено в рамках Европейской лидарной сети EARLINET. Для исследования высотной трансформации параметров аэрозоля были отобраны данные лидарных наблюдений в сети EARLINET на станциях:

– Aberystwys (52° с.ш., 4° з.д.) — крайняя северо-западная станция сети EARLINET на побережье Англии. При западном переносе для нее характерна минимальная степень наличия техногенных воздействий. Результаты измерений станции рассматриваются как фоновые — реперные для сравнения с данными измерений в других регионах.

– Palaiseau (49° с.ш., 2° в.д.) — в юго-западном направлении от Парижа. При западном переносе станция расположена перед первым индустриальным парижским регионом.

– Бельск (51° с.ш., 20° в.д.) — станция южнее Варшавы в лесной зоне, без источников индустриальных выбросов в окрестной зоне.

– Минск (53° с.ш., 27° в.д.) — станция Института физики НАН Беларуси.

На рис. 6 приведены результаты лидарных наблюдений в сети EARLINET, выполненных в летний период при выраженном западном переносе, охватывающем Европейский регион, взятых из [14].

Был обнаружен рост параметров мутности при переходе от западных регионов к восточным. Лишь в Беларуси замутненность несколько уменьшается. Минимальная аэрозольная нагрузка на всех высотах реализовалась в районе реперной станции Aberystwys. В Palaiseau в слое до 2 км содержание аэрозоля несколько возрастает. Аэрозольная нагрузка и оптическая аэрозольная толщина атмосферных масс после пересечения пространства Европы в Бельске и Минске существенно увеличиваются (до 5 раз).

Изучение влияния траектории переноса воздушных масс на характеристики аэрозольной компоненты в регионе-рецепторе основывалось на установлении корреляций между измеряемыми характеристиками

аэрозольных полей и типом траекторий, реализующихся в период измерений.

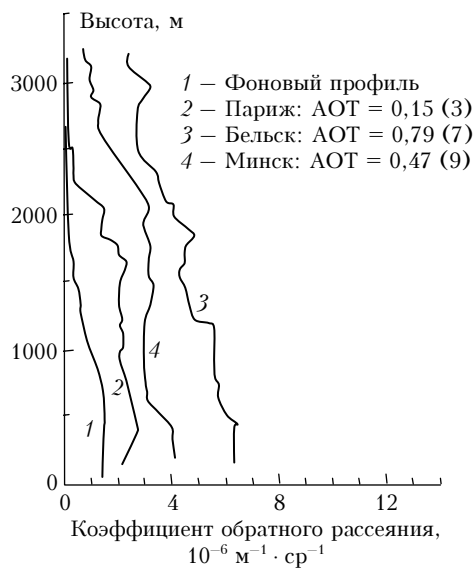


Рис. 6. Средние вертикальные профили показателя обратного рассеяния летом при западном переносе через пространство Европы на станциях: Aberystwys, Palaiseau, Belsk, Minsk. Аэрозольная оптическая толщина (АОТ), число измерительных дней указаны в скобках (данные исследований EARLINET [14])

Исходной информацией для статистического анализа стали данные двухгодичного цикла радиометрических измерений параметров атмосферного аэрозоля, выполненных в г. Минске в период 2002–2004 гг. В процессе обработки из совокупности результатов измерений были сформированы множества значений аэрозольной оптической толщины на длине волны 440 нм, а также общего содержания мелких и крупных частиц. Граничным радиусом для частиц двух фракций являлась величина 0,5 мкм. Для каждого измерения были отобраны «обратные» траектории, по которым примесь была доставлена в точку измерений. Исходными данными для анализа являлись 5-дневные обратные траектории для уровней 950, 850 и 700 гПа.

Обратные траектории переноса воздушных масс представляют собой совокупность координат в четырехмерном пространстве (трехмерное пространство + время), которые характеризуют предысторию движения воздушной массы, пришедшей в точку наблюдения с заданными координатами и высотой в фиксированный промежуток времени. Массив данных расчетов обратных траекторий для г. Минска (местоположение радиометрической станции Института физики НАН Беларуси) доступен в базе данных радиометрической сети AERONET.

Методом кластерного анализа из всего массива обратных траекторий были сформированы семь классов траекторий, которые обладали следующими свойствами:

- обратные траектории соответствовали времени проведения измерений параметров аэрозольных частиц;
- для каждой ситуации географические координаты траекторий на трех уровнях близки друг к другу,

т.е. в слое 950–700 гПа осуществляется подобный перенос воздушных масс;

– траектории переноса внутри класса близки друг другу в евклидовой метрике.

Число классов обратных траекторий выбиралось таким образом, чтобы достигалась достаточная детализация при представлении переноса аэрозоля в регионе Беларуси. С другой стороны, число наблюдений параметров аэрозоля, соответствующих каждому классу, оставалось статистически значимым. По этим признакам всего было отобрано 126 измерений и соответствующих наборов обратных траекторий.

На рис. 7, а представлены средние значения обратных траекторий для каждого из сформированных классов. Видно, что пятидневные траектории охватывают большую часть территории Европы.

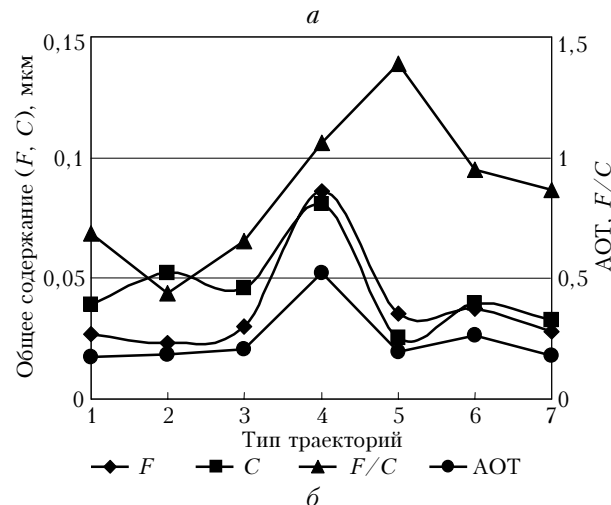
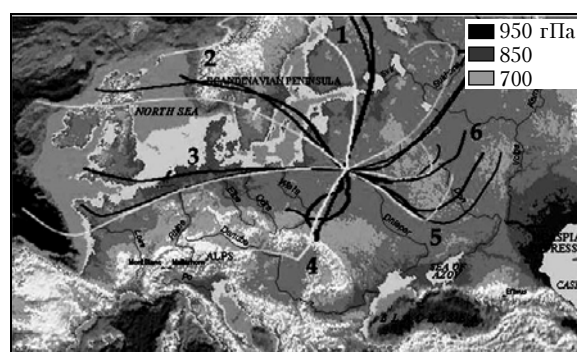


Рис. 7. Зависимость параметров аэрозольных частиц от траектории переноса воздушных масс: а – средние траектории семи классов «обратных» траекторий, сформированных методом кластерного анализа; б – распределение среднего значения общего содержания мелких ( $F$ ) и крупных ( $C$ ) частиц, их отношения ( $F/C$ ) и АОТ на длине волны 440 нм в зависимости от типа траектории переноса воздушных масс

В соответствии с разбиением «обратных» траекторий на 7 классов, массивы данных общего содержания мелких и крупных аэрозольных частиц, а также АОТ были разбиты на 7 подмножеств. Заключительной стадией процедуры обработки данных стала оценка средних значений наблюдаемых параметров взвешенных частиц для подмножеств измерений, соответствующих различным классам обратных траекторий.



На рис. 7, б приведены средние значения оптических и микрофизических параметров аэрозоля, которые реализуются в атмосфере в г. Минске в зависимости от типа траектории переноса воздушных масс, по которым примесь была доставлена в пункт наблюдений.

В соответствии с рис. 7 воздушные массы, приходящие из южных районов по отношению к г. Минску, приносят больше частиц, чем воздушные массы из других районов. При этом возрастает относительное содержание мелких частиц и аэрозольная оптическая толща максимальна.

Химический состав переносимого аэрозоля оказывается весьма разнообразным [15–18]. Во многих случаях частицы могут содержать тяжелые металлы в количествах, вредных для живых организмов. По оценкам Метеорологического синтезирующего центра «Восток» Программы ЕМЕР на территорию Беларуси за год поступает свинца более 100 т, кадмия — около 7 т, ртути — 2,1 т. При этом доля трансграничной составляющей для свинца более 80%, кадмия более 70%; 99% источников ртути находится за пределами Беларуси. Территориальная структура выпадений представлена на рис. 8.

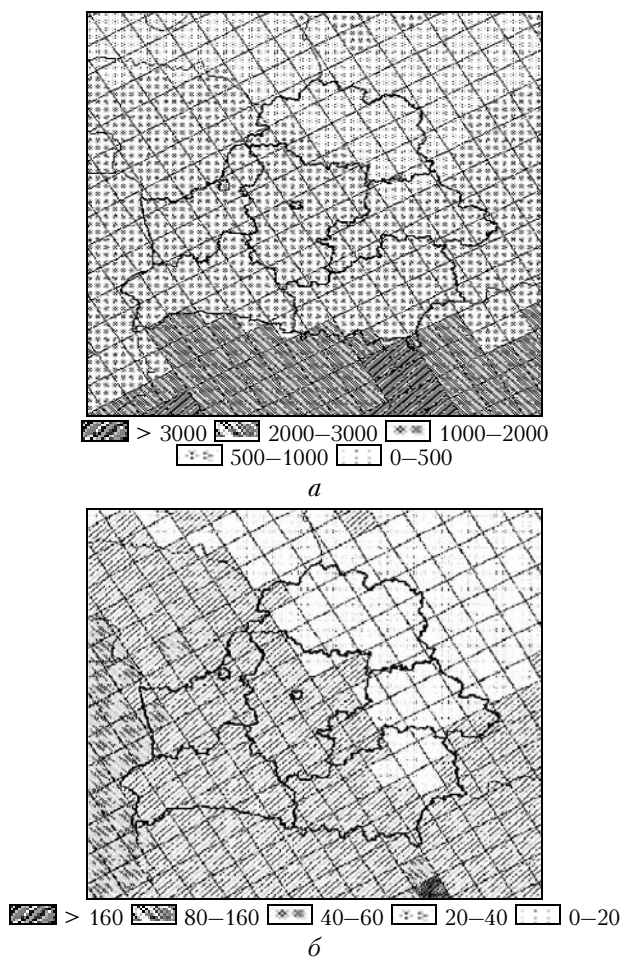


Рис. 8. Уровни выпадений свинца (а) и кадмия (б) на территории Беларуси (внешнее окаймление жирной замкнутой линией; линии внутри этой зоны определяют границы областей) по данным расчетов в рамках Программы ЕМЕР,  $\text{г}/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$

Видно, что основной градиент выпадений свинца — с юга на север, кадмия — с запада на восток. Таким образом, максимальные расчетные уровни выпадений свинца характерны для южных (полюсских) регионов Беларуси, кадмия — для западных. При расчете с использованием сохраняющего подхода превышения допустимых уровней выпадения свинца составляют 14% площадей всех естественных угодий страны и равны в среднем 3,7  $\text{г}/\text{га}/\text{год}$ .

Высокая плотность загрязнения радионуклидами почвы после аварии на Чернобыльской АЭС в зоне отчуждения является потенциально опасным источником загрязнения воздуха не только в этой зоне, но и в других регионах республики. Радиоактивное загрязнение воздуха в настоящее время формируется под действием процессов вторичного ветрового подъема (ресуспензии) и переноса радиоактивных частиц, которые зависят от многочисленных факторов природного и антропогенного происхождения. Экспериментальные исследования показали, что существенный перенос радиоактивных аэрозолей в 2004 и 2005 гг. вследствие ветровой эрозии почв и лесных пожаров не отмечался. Возможно, это явилось результатом того, что указанные годы были относительно спокойны в отношении пожаров и атмосферных аномалий.

## Моделирование процессов переноса загрязнений в атмосфере

Анализ переноса загрязнений требует разработки соответствующих моделей переноса. Были разработаны (или адаптированы к условиям Беларуси) модели переноса аэрозолей и газов (в том числе и радиоактивных), описывающих распространение загрязнений от антропогенных загрязняющих источников (под ними могут пониматься как трубы котельных, так и города), лесных пожаров, ветровой эрозии почв с охватом территорий от нескольких десятков до сотен километров (модели локальные и межрегиональные). Базовыми являлись данные по концентрации загрязняющих примесей на различных высотах и количество осевших на землю компонентов.

Для анализа и прогнозирования процессов переноса загрязнений разработана программа расчета трехмерных траекторий движения воздушных масс в свободной атмосфере и атмосферном пограничном слое. Программа основывается на метеоданных, представляемых Республиканским Гидрометеоцентром. Поскольку в число стандартно измеряемых метеорологическими центрами величин не входит вертикальная компонента скорости ветра, ее величина рассчитывалась на основе метеорологических моделей. Сопоставление расчетов вертикальной компоненты скорости ветра по трем моделям [19] позволило выбрать в качестве предпочтительной модель расчета вертикальной скорости по адиабатическим изменениям температуры.

Для определения поля скоростей внутри атмосферного пограничного слоя использовались имеющиеся в литературе методы параметризации характери-

стик атмосферного пограничного слоя. Сопоставление результатов расчетов обратных траекторий по разработанной программе с данными NASA, расчетами других авторов [20] показало их удовлетворительное согласие.

В 1986 г. авария на ЧАЭС вследствие взрыва и последующих ветровых потоков привела к радиоактивному загрязнению больших территорий. С использованием исходной информации о выбросах и метеорологической обстановке тех дней было выполнено численное моделирование распространения частиц полидисперсной примеси на расстояния до 1 тыс. км в переменном поле ветра из нестационарного точечного источника. Рассчитан нестационарный след примеси, и разработана процедура вычисления зависимости количества массы осевшей примеси от времени, прошедшего после аварии, в различных точках зоны загрязнения. На рис. 9, а представлены положения струи примеси в различные моменты времени после начала выброса. Они отражают тот факт, что в первые часы после аварии дул юго-восточный ветер.

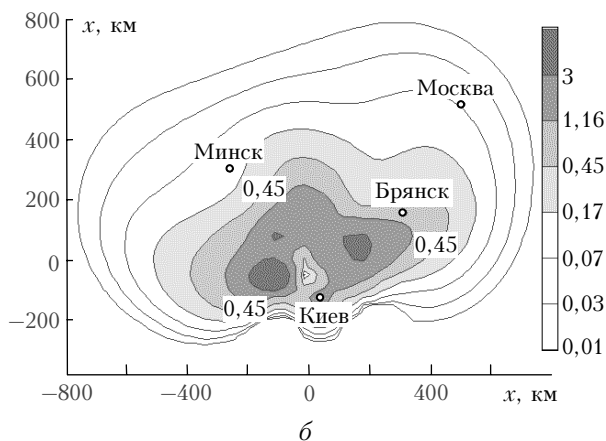
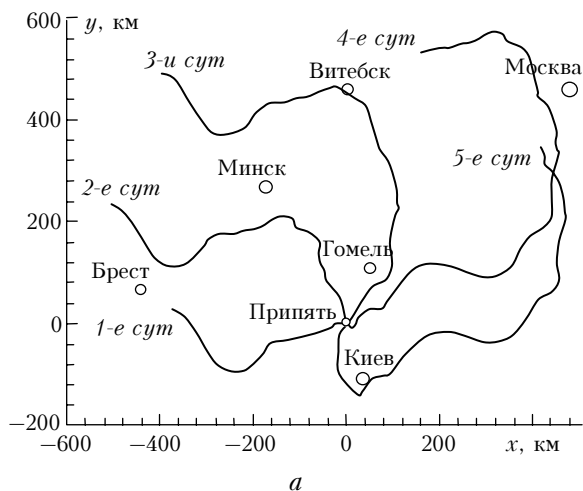


Рис. 9. Положение струи примеси на разные моменты времени после аварии на ЧАЭС (а); изолинии концентраций примеси в средней зоне загрязнения (без учета загрязнения ближней зоны крупными частицами) (б). Концентрации на изолиниях выбраны равными 0,01; 0,03, ..., 3,0 Кп/км<sup>2</sup>

В течение 5 сут его направление плавно менялось так, что струя примеси постепенно разворачивалась почти на 360°. На рис. 9, б изображены изолинии загрязнения в средней к станции зоне на 5-е сут после аварии.

Создана и апробирована на примере лесных пожаров локальная модель переноса примесей в атмосфере с использованием методики выбросов [21]. В модели отслеживается ветровой перенос двух примесей: мелких частиц золы и недожога (размер 0–100 мкм) и твердых частиц дыма. Считается, что средние и крупные частицы золы и недожога в атмосферу не поступают, а остаются на подстилающей поверхности непосредственно возле очага пожара. В качестве входных данных используются космические снимки лесных пожаров, метеоусловия с ближайшей к пожару метеостанции, цифровые карты загрязнения воздуха и подстилающей поверхности через 18 ч после обнаружения лесного пожара в районе г. Полоцка.

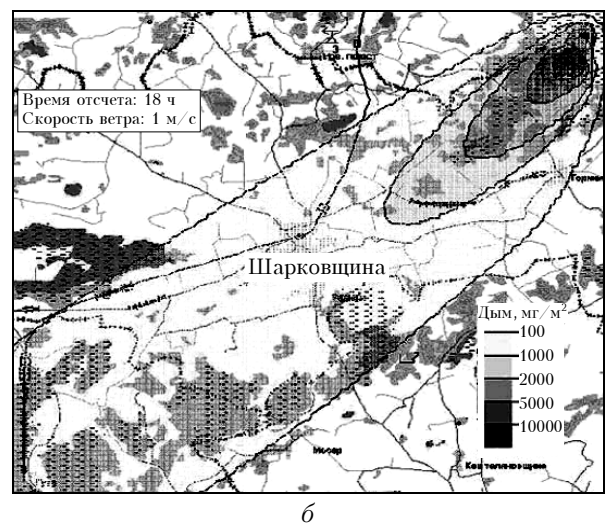
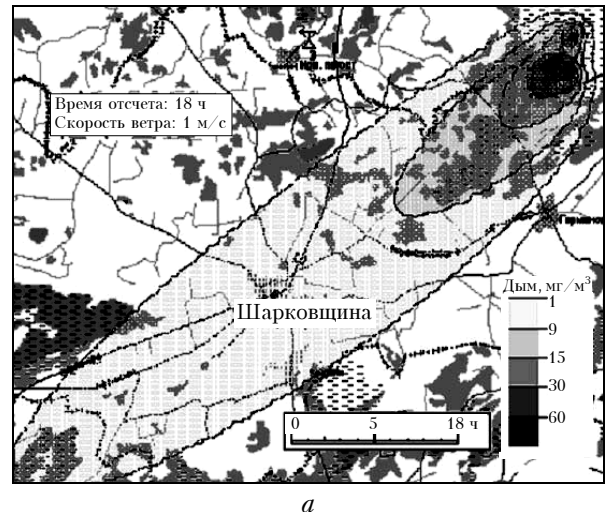


Рис. 10. Лесной пожар в районе г. Полоцк через 18 ч модельного времени: а — объемная концентрация аэрозоля на высоте 20 м (мг/м<sup>3</sup>); б — плотность загрязнения подстилающей поверхности, мг/м<sup>2</sup>



Для Беларуси, расположенной в центре Европы, имеющей в пределах республики и окружающих регионов крупные промышленные центры, большое значение имеет определение зон влияния, выбросы загрязняющих примесей в которых этот перенос инициируют. С этой целью разработана региональная модель переноса девяти загрязняющих компонентов, обусловленная выбросами загрязнений в атмосферу 15 городов Беларуси с интенсивностью для каждого более 2000 т/год. Поле ветра бралось из статистических данных за длительный период времени. На рис. 11 показано поле нормированной концентрации угарного газа на высоте 500 м после 9 ч модельного времени для июня.

Видно, что преобладает перенос в западном и юго-западном направлении и что длинные шлейфы загрязнений характерны для Минска, Новополоцка и Гомеля. Уязвимыми оказываются заповедные зоны и охотничьи хозяйства, расположенные по р. Сож и в Полесье.

В легенде к карте (справа) приведены основные числовые характеристики рассматриваемого процесса: названы примеси, которые можно анализировать; конкретная рассматриваемая примесь; дата, начало отсчета времени, текущее время; высота (она может быть разной), на которой проводится измерение; максимальная концентрации примеси на этой высоте (для CO – 6,8 мкг/м<sup>3</sup> на высоте 500 м); пре-

дельно допустимая концентрация (CO – 3000 мкг/м<sup>3</sup>); масса выброшенной примеси (в данном случае 41,53 т к 9 ч модельного времени); общая масса находящейся в атмосфере примеси (CO – 28,48 т); интенсивность выбросов (CO – 110,14 т/сут) и т.д.

Результаты проведенных исследований размещены на информационном сайте программы «Трансграничный мониторинг» (<http://www.tm.basnet.by/ru/index.htm>).

### Основные выводы

Результатом выполнения комплексной программы стало создание технической и методической базы для исследования процессов трансграничного мониторинга с применением систем дистанционного зондирования. Системы дистанционного зондирования включены в международные измерительные сети EARLINET, AERONET, GAW.

Созданы лидарный и радиометрический комплексы для измерения параметров атмосферных компонентов. Разработан экспериментальный образец аппаратно-программного комплекса, предназначенный для приема и тематической обработки космической информации с космических аппаратов NOAA, а также передачи результатов потребителям. Его применение для идентификации тепловых аномалий обеспечивает вероятность обнаружения до 80%.

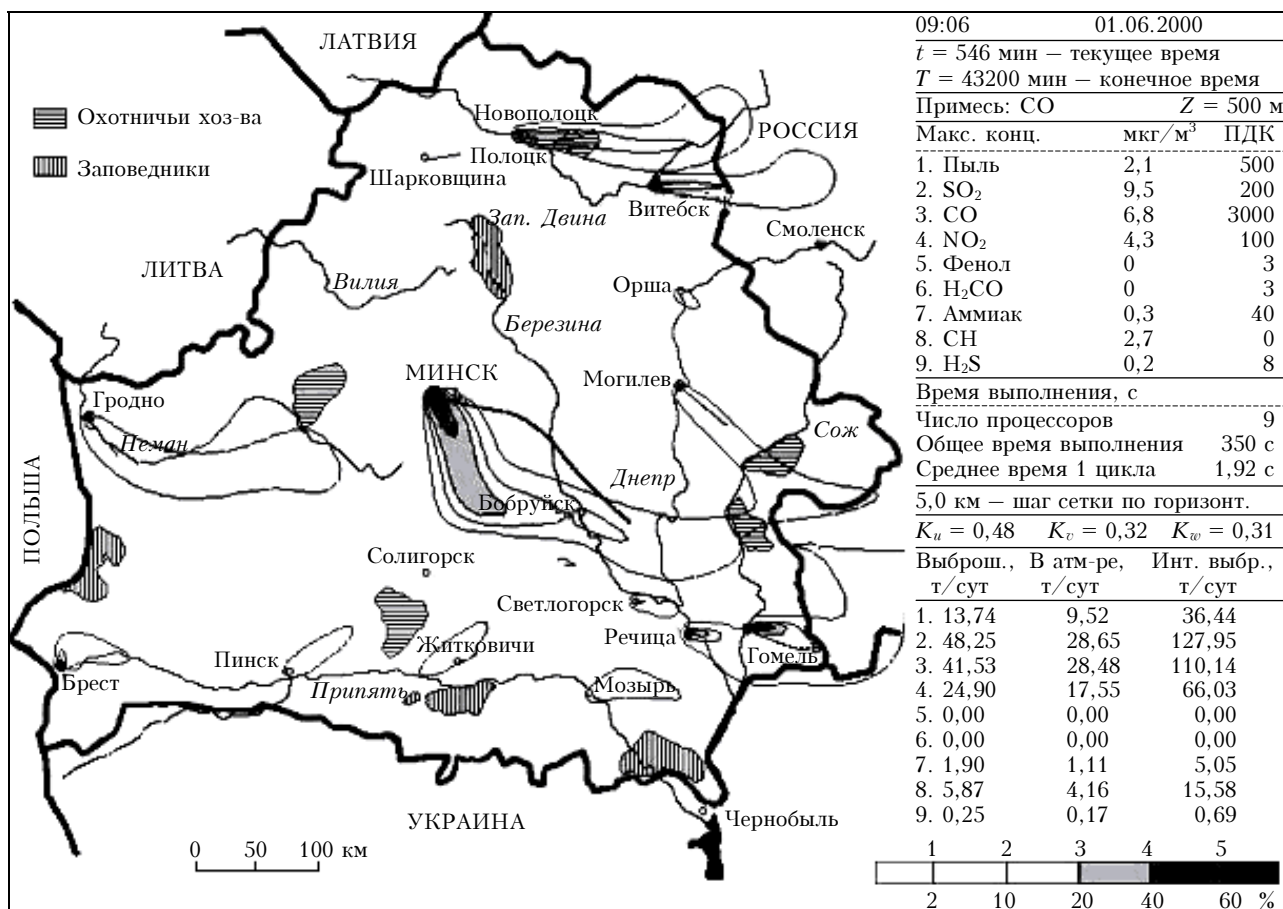


Рис. 11. Концентрация угарного газа CO над территорией Беларуси после 9 ч модельного времени

Разработан и использован на практике алгоритм оценки вертикального распределения концентраций крупной и мелкой фракций тропосферного аэрозоля на основе использования данных согласованного зондирования аэрозольного слоя многоволновым лидаром и солнечным радиометром CIMEL.

Изучены процессы формирования озоновых аномалий в регионе Беларуси, которые образуются в основном в Северной Атлантике и переносятся в восточном направлении. В последние годы наблюдалось определенное увеличение возникновения отрицательных озоновых аномалий.

Оценены воздействия процессов крупномасштабного переноса на содержание взвешенных частиц в атмосфере в регионе Беларуси. Воздушные массы из южных по отношению к Беларуси регионов оказываются в среднем более загрязненными взвешенным веществом.

Разработаны и адаптированы к условиям Беларуси локальные и межрегиональные модели переноса аэрозолей и газов в масштабах от нескольких десятков до сотен километров.

Дана количественная оценка вклада различных центров (районов) в общую картину загрязнения Беларуси. Обнаружено, что длинные шлейфы загрязнений, характерные для городов Минск, Новополоцк и Гомель, оказывают вредное воздействие на заповедные зоны и охотничьи хозяйства, расположенные по р. Сож и в Полесье.

Сформированы интегрированный сайт и база данных о параметрах загрязняющих компонентов атмосферы, ориентированная на решение задач контроля крупномасштабного переноса.

1. Чайковский А.П., Иванов А.П., Балин Ю.С., Ельников А.В., Тулинов Г.Ф., Плюснин И.И., Букин О.А., Чен Б.Б. Лидарная сеть CIS-LiNet для мониторинга аэрозоля и озона: методология и аппаратура // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18. № 12. С. 1066–1072.
2. Bösenberg J., Ansmann A., Baldasano J., Balis D., Böckmann C., Calpini B., Chaikovskiy A., Flamant P., Hagard A., Mitev V., Papayannis A., Pelon J., Resendes D., Schneider J., Spinelli, Trickle T., Vaughan G., Visconti G., Wiegner M. EARLINET: A European aerosol research lidar network // Adv. in Laser Remote sens.: Selected papers 20<sup>th</sup> Int. Laser Radar Conference (ILRC). Vichi, France, 2000. P. 155–158.
3. Turishev L.N., Krasovski A.N., Atrasheuski Yu.I., Zhuchkevich V.V., Borkovskiy N.B. UV-B monitoring in Belarus // Proc. XX quadrennial ozone sympos. V. 2. Athens, Greece, 2004. P. 1108–1109.
4. Krasovskiy A.N., Denisenko V.N., Ludchik A.M., Turishev L.N. Ozone net instrumentation developed in Belarus // Proc. of the quadrennial ozone sympos. Saporo, 2000. P. 493–494.
5. Liudchik A. Concept of Selfcalibration for the Network Total Ozone Meters // Proc. of Global. Atmosphere Watch (GAW) Workshop. Riga, 2002. P. 85–88.

6. Chaikovskiy A.P., Dubovik O., Holben B.N., Bril A.I. Methodology to retrieve atmospheric aerosol parameters by combining ground-based measurements of multi-wavelength lidar and sun sky-scanning radiometer // Proc. SPIE. 2002. V. 4678. P. 257–268.
7. Chaikovskiy A., Bril A., Barun V., Dubovik O., Holben B., Tompson A., Goloub Ph., Sobolevskiy P. Studying altitude profiles of atmospheric aerosol parameters by combined multi-wavelength lidar and sun sky radiance measurements // Rev. and revised papers presented at the 22<sup>nd</sup> Int. Laser Radar Conf. (ILRC 2004). Matera, Italy, 2004. P. 345–348.
8. Murayama T., Sugimoto N., Matsui I., Lio Zh., Sakai T., Shibata T., Iwasaka Y., Won J.G., Yoon S.C., Li T., Zhou J., Hu H. Lidar network observation of Asian dust // Adv. in Laser Remote sens.: Selected papers 20<sup>th</sup> Int. Laser Radar Conference (ILRC). Vichi, France, 2000. P. 169–177.
9. Bluth G.J.S., Doiron S.D., Schnetzler C.C., Krueger A.J. Global tracking of the SO<sub>2</sub> clouds from the June 1991 Mount Pinatubo eruption // Geophys. Res. Lett. 1992. V. 19. P. 151–154.
10. McCormick M.P., Veiga R.E. SAGE-II measurements of early Pinatubo aerosols // Geophys. Res. Lett. 1992. V. 19. P. 155–158.
11. Иванов А.П., Чайковский А.П., Осипенко Ф.П., Щербачев В.Н., Пухальский С., Соболевский П. Динамика оптических характеристик аэрозольного слоя Пинатубо по данным спектрально-поляризационных лидарных измерений // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2000. Т. 36. № 1. С. 105–111.
12. Wandinger U., Mattis I., Matthias Tesche M., Ansmann A., Bösenberg J., Chaikovski A., Freudenthaler V., Komguem L., Linner H., Matthias V., Pelon J., Sauvage L., Sobolewski P., Vaughan G., Miegner M. Air-mass modification over Europe: EARLINET aerosol observations from Wales to Belarus // J. Geophys. Res. 2004. V. 109. D24205. doi: 10.1029/2004JD005142.
13. Chaikovskiy A., Bril A., Dubovik O., Holben B., Thompson A., Goloub Ph., O'Neill N., Sobolewski P., Bösenberg J., Ansmann A., Wandinger U., Mattis I. CIMEL and multiwavelength lidar measurements for troposphere aerosol altitude distributions investigation, long-range transfer monitoring and regional ecological problems solution: field validation of retrieval techniques // Óptica Pura y Aplicada. 2004. V. 37. N 3. P. 3241–3246.
14. EARLINET: A European Aerosol Research Lidar Network to Establish an Aerosol Climatology. Report No. 348 / J. Bösenberg, V. Matthias, Editors. Hamburg: Max-Planck-Institut für Meteorologie, 2003. 191 p.
15. Хомич В.С., Какарека С.В., Парфенов В.В. Анализ структуры полей распределения тяжелых металлов в почвах г. Минска // Природопользование. 1996. № 1. С. 134–139.
16. Хомич В.С., Какарека С.В., Кухарчик Т.И. Особенности распределения микроэлементов в депонирующих компонентах городских ландшафтов (на примере г. Гомеля) // Природные ресурсы. 1997. № 1. С. 85–93.
17. Хомич В.С., Какарека С.В., Кухарчик Т.И., Кравчук Л.А., Федоров А.Б. Загрязнение природной среды тяжелыми металлами в зоне производства хрусталя // Весці НАН Беларусі. Сер. хімічных навук. 2001. № 1. С. 98–103.

18. Хомич В.С., Какарека С.В., Кухарчик Т.И., Парфенов В.В. Пространственная структура, уровни и источники загрязнения почв г. Минска // Природные ресурсы. 2003. № 4. С. 42–53.
19. Зверев А.С. Синоптическая метеорология. Л.: Гидрометеониздат, 1977. 711 с.
20. Thomson Ann & Kuchera Tom. Site: <http://croc.gsfc.nasa.gov/aeronet/IMAGES/>
21. Методика оценки и расчета выхода загрязненных радионуклидами продуктов горения при лесных пожарах. М.: Мин-во природных ресурсов Российской Федерации, 2002. 37 с.

*A.P. Ivanov, A.P. Chaikovskii, E.P. Zege, V.P. Kabashnikov, S.V. Kakareka, V.L. Katkov, A.N. Krasovskii, V.M. Popov. Study of transboundary transport of pollution in the atmosphere of the Republic of Belarus.*

Lidar and radiometric complex for aerosol and ozone concentration measuring in the atmosphere has been designed. An algorithm of combined lidar and solar photometer data processing has been developed. To obtain information in neighboring regions, the data of global and regional observation networks for atmosphere monitoring has been involved. Data on ozone layer observations in the region of Belarus has been presented. Ozone abnormalities formation is reasoned by the «ozone holes» transport process. A program to calculate three-dimensional trajectories of the air masses transport in the open atmosphere and boundary atmospheric layer has been worked out. Local and interregional models aerosol and gazes transport within several dozens to hundreds of kilometers has been developed and Belarus adapted. Large industrial centers influence on the aerosol and gazes pollution of the Belarusian territory has been evaluated.