

УДК 502.3:[551.501.815+551.501.816+528.7](470.23-25)

Д.А. Самуленков, И.Н. Мельникова, В.К. Донченко, М.В. Сапунов

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЙ АТМОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ ЛИДАРНОГО МОНИТОРИНГА

Ресурсный центр «Обсерватория экологической безопасности» научного парка
Санкт-Петербургского государственного университета, i.melnikova@spbu.ru

D.A. Samulenkov, I.N. Melnikova, V.K. Donchenko, M.V. Sapunov

STUDYING POLLUTION OF THE ATMOSPHERE WITH LIDAR MONITORING

В статье изложены основные положения разработки новых дистанционных методов исследований экологического климата атмосферы. Рассмотрены лидарные средства измерений атмосферных загрязнений над Санкт-Петербургом. Показаны возможности проведения исследований с применением мобильного лидарного комплекса. Представлены результаты лидарных измерений, полученные с помощью стационарного лидарного комплекса. Проведен анализ полученных данных совместно с данными аэрологического зондирования. Лидарное зондирование совместно с данными аэрологического зондирования позволяет проводить исследования в экологической области дистанционным методом.

Ключевые слова: *аэрозольный лидар, доплеровский лидар, атмосферное загрязнение, аэрозоли, экологическая безопасность.*

The article outlines the main provisions for the development of new remote methods for studying the ecological climate of the atmosphere. Lidar means of measuring atmospheric pollution over St. Petersburg are considered. The possibilities of conducting research using a mobile lidar complex are shown. The results of lidar measurements obtained with the aid of a stationary lidar complex are presented. The obtained data are analyzed together with aerological sounding data. Lidar sounding supplemented with data of aerological sounding provide conduct studies in the ecological field by a remote method on a global scale.

Keywords: *aerosol lidar, doppler lidar, atmospheric pollution, aerosols, environmental safety.*

Введение

Атмосферные загрязнения формируются под воздействием множества факторов, таких как антропогенные выбросы, естественные источники и метеорологические параметры. Среди основных источников антропогенного загрязнения атмосферы выделяют выбросы, выделяющиеся в ходе промышленных процессов, продукты сгорания органического топлива, частицы, образующиеся при изнашивании автомобильных шин. За естественные источники загрязнения принимают те, формирование которых не зависит от деятельности человека. Например, при испарении капель морской пены выделяются частицы соли, растения производят пыльцу, ветер уносит частицы почвы и разносит пыль.

Автодороги являются одним из источников образования пыли в приземном воздушном слое. При движении автомобилей происходит истирание дорожных покрытий и автомобильных шин, продукты износа которых смешиваются с твердыми

частицами отработанных газов. К этому добавляется грязь, занесенная на проезжую часть с прилегающего к дороге почвенного слоя. В результате образуется пыль, поднимающаяся в воздух. Она может переноситься ветром на расстояния от нескольких до сотен километров.

Компоненты атмосферных аэрозолей, как и метеопараметры, обладают высокой изменчивостью в атмосфере. Потоки воздушных масс переносят атмосферные загрязнения на большие расстояния, и поэтому важно установить их преимущественные направления.

В приземном слое атмосферы толщиной 1–2 км создаются особые условия динамического режима, происходит интенсивный обмен с поверхностью энергией и веществом. В условиях большого города это приводит к возникновению шапки загрязнений над городом. Безветренная погода усиливает концентрацию атмосферных аэрозолей, состоящих в основном из пылевых и сажевых частиц.

Для определения вертикальной структуры шапки загрязнений над большим городом на примере Санкт-Петербурга используются результаты лидарного зондирования атмосферы. Также необходимо использовать при анализе результаты регулярного аэрологического зондирования с помощью радиозондов, определяющие вертикальные профили метеопараметров. Сопоставление особенностей вертикальных профилей содержания и характеристик атмосферных аэрозолей, температуры, влажности и характеристик ветра помогает выявлять ключевые факторы формирования атмосферных загрязнений и преимущественные направления их переноса. Сравнение с вертикальным распределением аэрозолей над Финским заливом поможет пониманию особенностей формирования городской атмосферы.

Лидарное оборудование

В Санкт-Петербурге осуществляется исследование атмосферы, проводятся регулярные лидарные и радиометрические измерения в рамках сетей EARLINET и AERONET, что дает возможность исследовать вертикальную структуру атмосферных загрязнений над исследуемыми территориями. Важнейшим элементом при выполнении подобных изысканий является получение данных натурных экспериментальных измерений: в условиях города – с помощью стационарных лидарных систем и за городом – с помощью мобильной лидарной системы, смонтированной на автомобильной платформе. Экспериментальные данные высокого качества и строгие теоретические методы, позволяющие проводить расчеты важных характеристик, необходимых для выполнения климатических прогнозов, будут способствовать полному учету информации о состоянии атмосферы и позволят создать модели атмосферы, наиболее адекватные реальности.

Стационарная лидарная система обеспечивает сбор информации из нижнего приземного слоя атмосферы и из тропосферы. Результатами измерений являются вертикальные профили параметров атмосферного аэрозоля: средний и эффективный радиусы частиц; числовая, поверхностная, объемная и массовая концентрации частиц; комплексный показатель преломления вещества частиц; коэффициент деполяризации; коэффициенты обратного рассеяния и экстинкции аэрозоля; размер детектируемых аэрозолей в диапазоне от 0,1 до 11 мкм; определение

перечисленных параметров загрязнений на наклонных и горизонтальных трассах, а также параметры атмосферы: скорость ветра; турбулентность; направление ветра.

Лидарные системы позволяют:

- определять местоположение и отслеживать эволюцию естественных и искусственных аэрозольных образований в атмосфере;
- исследовать физическую структуру аэрозоля и оценивать интегральный размер частиц аэрозоля;
- дистанционно определять скорость и направление ветра на различных высотах;
- вести картографирование местности с нанесением на цифровую карту местности концентраций аэрозолей и химических примесей в атмосфере;
- формировать прогноз распространения примесей в атмосфере по результатам измерений концентраций примесей и по измеренной актуальной ветровой обстановке;
- оперативно выявлять источники загрязнения атмосферы;
- формировать заданную форму отчетов по результатам измерений;
- хранить базы данных проведенных ранее измерений и управлять ими.

В состав стационарного многоволнового комплекса включены: доплеровский гетеродинный лидар для измерения скорости и направления ветра с диапазоном измерения скорости ветра от 0,5 до 40 м/с и погрешностью менее 0,5 м/с, а также погрешностью измерения направления ветра не более 5°; и аэрозольный лидар с излучателем в виде Nd:YAG-лазера, работающим на следующих длинах волн: 355; 532 и 1064 нм.

Мобильный лидарный комплекс (рис. 1) является транспортируемым модулем на носителе (платформе масштаба микроавтобуса), в котором размещается оборудование лидарной системы и кабина управления, и позволяет проводить

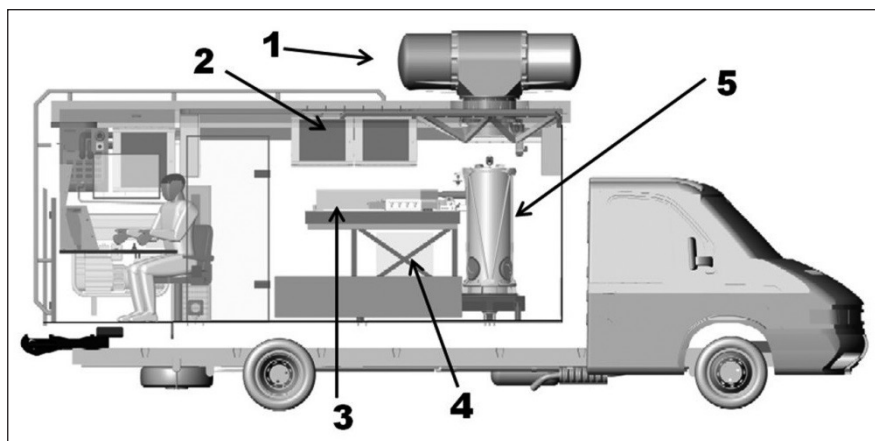


Рис. 1. Схема мобильного лидарного комплекса: 1 – сканер; 2 – система управления измерительными приборами; 3 – аэрозольный лидар; 4 – антивибрационный оптический стол; 5 – телескоп

экологический мониторинг в различных географических точках в полевых условиях. Мобильный комплекс представляет собой полностью автономную и высоко автоматизированную систему, имеющую собственное энергоснабжение и климатическую установку. В мобильном комплексе также установлен коротковолновый лидар дифференциального поглощения (КВ-ДП) с перестраиваемым многоволновым Ti:Sph-лазером (700–960, 350–480, 230–310 нм). Дополнительный лидар позволяет дистанционно детектировать концентрацию малых газов в атмосфере (SO_2 , NO_2 , Cl_2 , O_3), линии поглощения которых совпадают с диапазоном излучения лазера [1].

Ассимиляция данных о направлении и скорости распространения экотоксикантов позволяет оперативно оценивать риски наступления экологически опасной ситуации, строить прогнозы развития загрязнения окружающей среды и формировать рекомендации для лиц, принимающих решения, обеспечивая возможность быстрого реагирования для устранения опасности или эвакуации населения [10, 11]. Решение задачи оценки рисков позволяет отслеживать объективные числовые значения, характеризующие состояние окружающей среды, в частности состояние среды большого города. Такую задачу следует назвать обратной задачей экологического мониторинга [3, 4], которая включает в себя следующие этапы:

1. Обработка данных наземного оптического зондирования.
2. Решение обратной задачи оптики лазеров (результат – оптические параметры атмосферы – коэффициенты поглощения и рассеяния и индикатриса рассеяния).
3. Решение обратной задачи микрофизики аэрозолей (концентрации примесей в атмосфере, размер аэрозольных частиц, направление и скорость их переноса в атмосфере).
4. Решение обратной задачи экологической безопасности – параметризация характеристик атмосферных примесей в терминах теории риска для расчета рисков тех или иных событий (превышение концентрации загрязнителей ПДК в атмосфере и направление их распространения в сторону густонаселенных районов).
5. Оперативное определение значений рисков тех или иных экологически опасных событий позволяет проводить управление устойчивым развитием региона.

Полученные результаты и их анализ

Стационарный и мобильный многоволновые лидарные комплексы [1] дают информацию о концентрации и физической природе атмосферного аэрозоля, о химическом составе газовой фазы атмосферы, о ветре и турбулентности на расстоянии до 10–12 км на вертикальной и наклонных трассах в любых направлениях. Лидарный комплекс включает в себя комплектующие и технологии современного уровня, как российских, так и зарубежных производителей, и позволяет осуществлять дистанционное зондирование в широком спектральном диапазоне длин волн.

Лазерные импульсы длительностью порядка 10 нс, распространяясь в атмосфере, взаимодействуют с различными ее составляющими и частично рассеиваются назад к лидару. Сигналы обратного рассеяния в атмосфере от каждого лазера

принимаются одним телескопом и направляются на соответствующий приемник. Принятый сигнал передается в управляющий компьютер, где происходит его обработка в реальном масштабе времени. В компьютере предусмотрена первичная обработка «сырого» сигнала (учет фоновой засветки, сглаживание по группе импульсов). В результате получаются временные вариации вертикальных профилей.

Далее решается *обратная задача лидарного зондирования* – восстановление концентраций определяемых веществ [2]. Для этого были разработаны специальные алгоритмы решения всего набора обратных задач, которые отличаются методами и подходами к регуляризации решений для разных исследуемых компонентов [14]. На выходе предлагается как сглаженный сигнал обратного лидарного рассеяния, так и информация о количестве загрязняющих веществ, их сравнение с пороговыми значениями, направление и скорость их распространения, то есть фактически осуществляется *первый этап обратной задачи экологической безопасности*.

Коэффициенты рассеяния аэрозоля

На рис. 2 представлены результаты лидарных измерений за 27 июля 2016 г., полученные с помощью стационарного лидарного комплекса, расположенного в здании Института наук о Земле при СПбГУ.

На них изображены пространственно-временные вариации аэрозольных слоев над городом [4]. Как видно из рисунков, аэрозольная шапка имеет несколько слоев различной плотности. Обратим внимание на то, что в начале измерений ее толщина достигала 2,6 км, а спустя 2 ч толщина слоя загрязнений уменьшилась и составила около 1,8 км. Вертикальная структура и динамические вариации сигнала указывают на выраженную стратификацию в атмосфере и заметную турбулентность.

Используя зарегистрированные значения сигнала обратного рассеяния лазерного излучения, восстанавливают оптические и микрофизические параметры частиц, то есть решают обратную задачу лидарного зондирования и обратную задачу теории рассеяния [5]. Оптические параметры – это объемные коэффициенты ослабления и обратного рассеяния на разных расстояниях по лучу зондирования. Эти коэффициенты позволяют решить задачу восстановления микрофизических параметров частиц: численное, поверхностное и объемное содержание частиц, распределение частиц по размерам на разных высотах (или расстояниях при зондировании на горизонтальных трассах), средний размер частиц, их комплексный показатель преломления, что дает информацию о веществе частицы. Измерения степени деполяризации частиц обеспечивают информацию о форме частиц.

Концентрация твердых загрязнений в атмосфере

Характеристикой количества аэрозольных частиц в воздухе является их *концентрация* (точнее, счетная концентрация) – число частиц в единице объема. Однако дисперсность аэрозолей приводит к тому, что задания одной концентрации для описания ансамбля аэрозольных частиц недостаточно – очевидно, что частицы различных радиусов могут иметь существенно разную концентрацию. Поскольку частицы разного размера имеют разную поверхность и объем, оценивают их поверхностную и объемную концентрации.

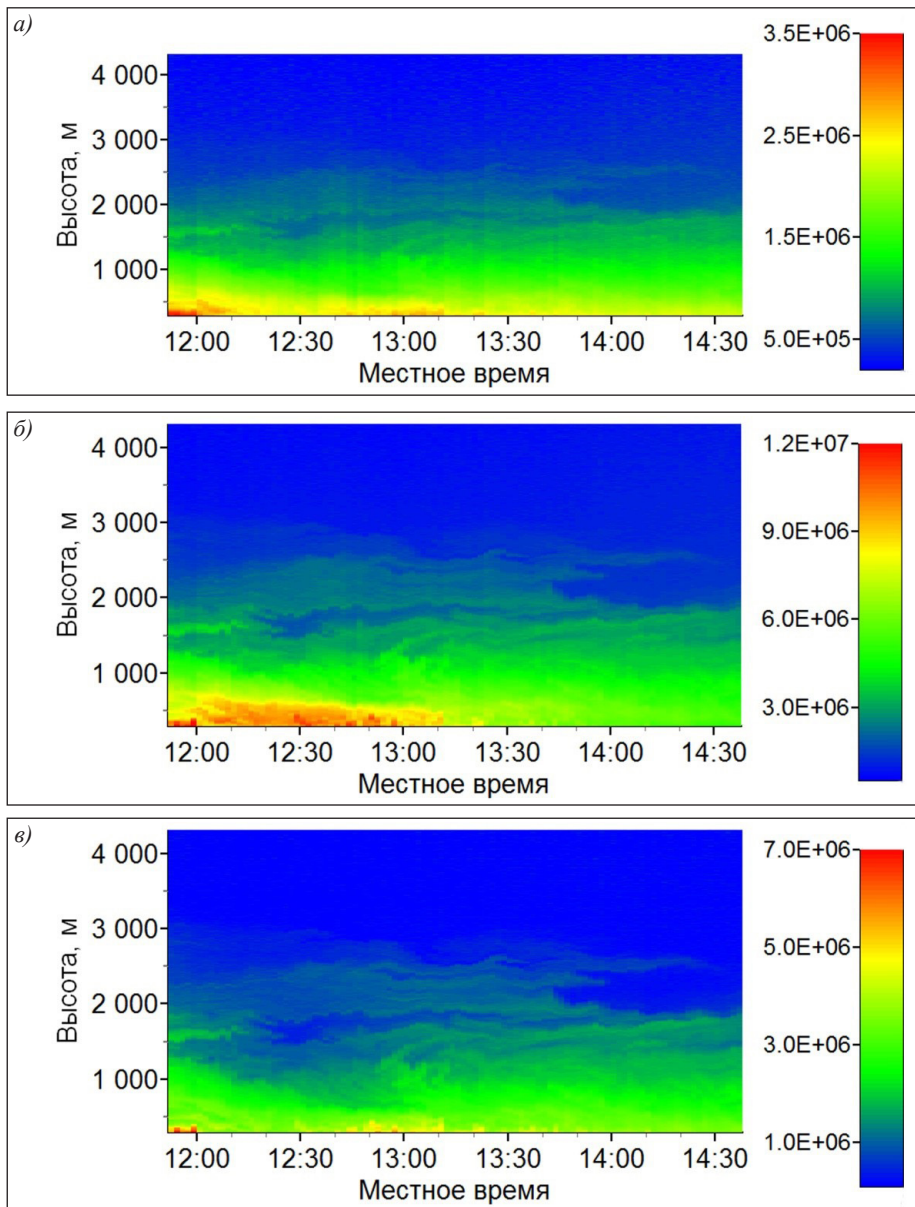


Рис. 2. Лидарные сигналы для трех каналов:
 а – 355 нм; б – 532 нм; в – 1064 нм (Санкт-Петербург, 27 июля 2016 г.)

На рис. 3 представлен вертикальный профиль численного, поверхностного и объемного содержания частиц в шапке загрязнений над городом, полученный из обработки данных измерений, показанных на рис. 2. Значения объемной

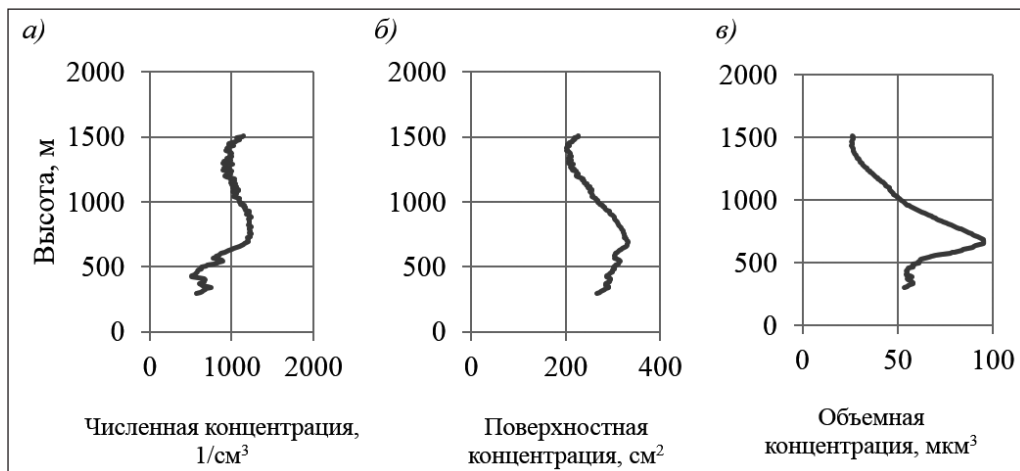


Рис. 3. Вертикальные профили содержания твердых частиц в шапке загрязнений:
 а – численная концентрация; б – поверхностная концентрация;
 в – объемная концентрация (Санкт-Петербург, 27 июля 2016 г.)

концентрации частиц легко преобразовать в массовую концентрацию, умножая на плотность частиц, которая, в свою очередь, определяется по показателю преломления. Массовая концентрация загрязнений в атмосфере уже является экологическим параметром, и ее значения следует сравнивать с ПДК, а в случае превышения пороговых значений – оповещать лиц, принимающих решения: *решение обратной задачи экологической безопасности*.

Вертикальный профиль объемного распределения частиц по радиусам

Твердые частицы в атмосфере имеют существенно разные размеры. Этот разброс размеров аэрозольных частиц именуют их *дисперсностью*. Совокупность аэрозольных частиц всех возможных радиусов называется *ансамблем частиц*. Следовательно, необходимо ввести еще одну характеристику аэрозольного ансамбля, связывающую концентрацию и радиус $N(r)$.

Для определения функций распределения по размерам реальных ансамблей атмосферных аэрозолей используют такие экспериментальные измерения их концентрации, как функции радиуса, то есть $N(r)$. Далее полученные из обработки эксперимента функции $f(r)$ обычно аппроксимируют аналитическими выражениями. Одним из «наиболее популярных» является логарифмически нормальное распределение (сокращенно – логнормальное)

$$f(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}rs} \exp \left[-\frac{1}{2s^2} \ln^2 (r / r_0) \right]. \quad (1)$$

Логнормальное распределение (1) – это распределение величины, логарифм от которой распределен по нормальному (гауссову) закону. Оно полностью характеризуется двумя параметрами: средним (в смысле значения логарифма)

радиусом r_0 и дисперсией s . Первый из этих параметров характеризует общие размеры частиц ансамбля (чем больше r_0 , тем в среднем крупнее частицы ансамбля), второй – разброс радиусов (чем больше s , тем меньше разница между концентрациями частиц разных радиусов).

На рис. 4 представлен вертикальный профиль объемного распределения частиц по размерам, полученный при обработке измерений стационарного лидарного комплекса 27 июля 2016 г. Как видно из графика, значительную часть аэрозольных частиц составили мелкие частицы PM_{1,0}–PM_{3,5}, причем содержание частиц со средним радиусом менее 1 мкм увеличивается в слое атмосферы ниже 600 м.

Для описания размеров частиц вводят средний и эффективный радиусы

$$r_{mean} = \int_0^{\infty} rN(r)dr \quad \text{и} \quad r_{eff} = \int_0^{\infty} r^3 N(r)dr / \int_0^{\infty} r^2 N(r)dr.$$

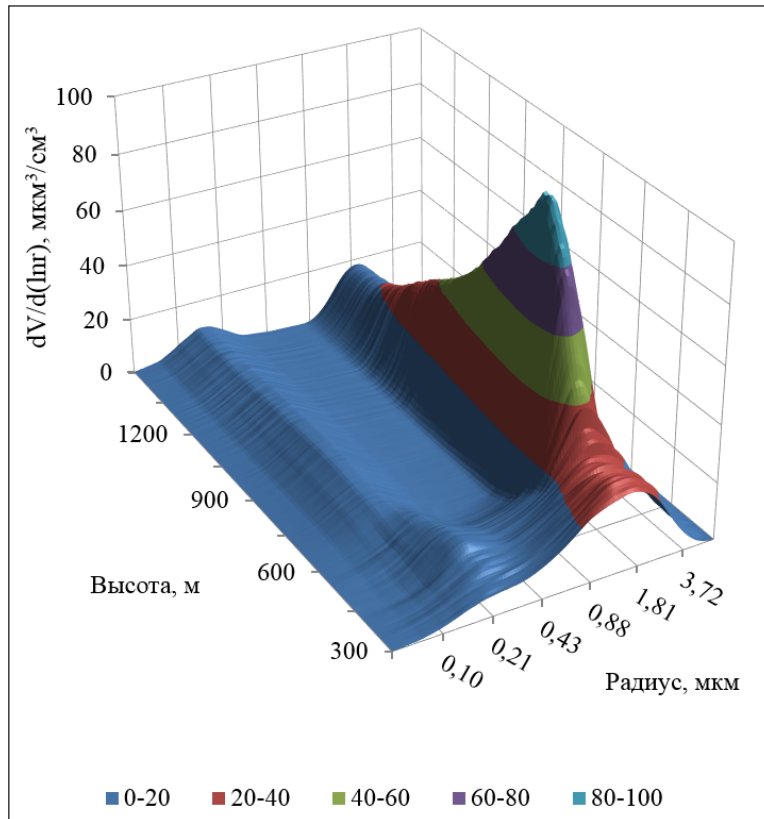


Рис. 4. Вертикальный профиль объемного распределения аэрозольных частиц по их радиусам (Санкт-Петербург, 27 июля 2016 г.)

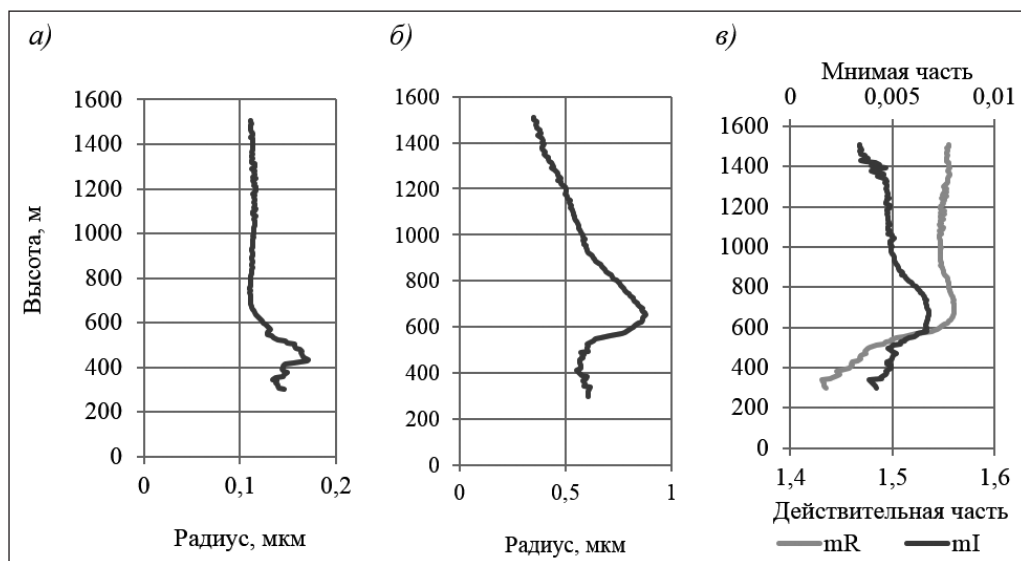


Рис. 5. Вертикальные профили средних размеров частиц: *а* – средний радиус; *б* – эффективный радиус; *в* – действительная (светлая линия) и мнимая (темная линия) части комплексного показателя преломления (Санкт-Петербург, 27 июля 2016 г.)

На рис. 5, *а* и *б* показаны вертикальные профили этих параметров, восстановленные по лидарным измерениям, проведенным в стационарном лидарном комплексе 27 июля 2016 г. Видно, что зависимость от высоты различается. Максимум среднего радиуса расположен ниже: на высотах 400–600 м, в то время как максимум эффективного радиуса явно совпадает с максимумами обеих частей комплексного показателя преломления.

Значения комплексного показателя преломления (рис. 5, *в*) указывают на то, что ниже 600 м в атмосфере находятся частицы, менее поглощающие свет: $Re = 1,44...1,50$ и $Im = 0,003...0,005$, причем видно, что с высотой состав частиц резко меняется.

Это обстоятельство также ярко выражено на рис. 2 в видимом канале 532 нм значительно увеличенной яркостью сигнала. Выше 600 м действительная часть показателя преломления достигает значений $Re = 1,55$ и не меняется с высотой. Мнимая часть имеет максимум на высотах 600–800 м – $Im = 0,007$, а выше уменьшается до значений $Im = 0,003$. Полученные значения указывают на присутствие минеральной пыли ниже 600 м и сажи – выше 600 м. Соответственно, плотность вещества частиц можно оценить как $1,5 \text{ г/м}^3$ ниже 600 м и 2 г/м^3 выше 600 м. Тогда можно получить вертикальный профиль массовой концентрации частиц в шапке загрязнений атмосферы над Санкт-Петербургом, представленный на рис. 6 (27 июля 2016 г.).

Для более полной оценки состояния атмосферы на рис. 7 демонстрируются вертикальные профили метеорологических характеристик, полученных при аэрологических измерениях на метеостанции в пос. Воейково в 12 ч по всемирному координированному времени. Как видно из данных аэрологических измерений,

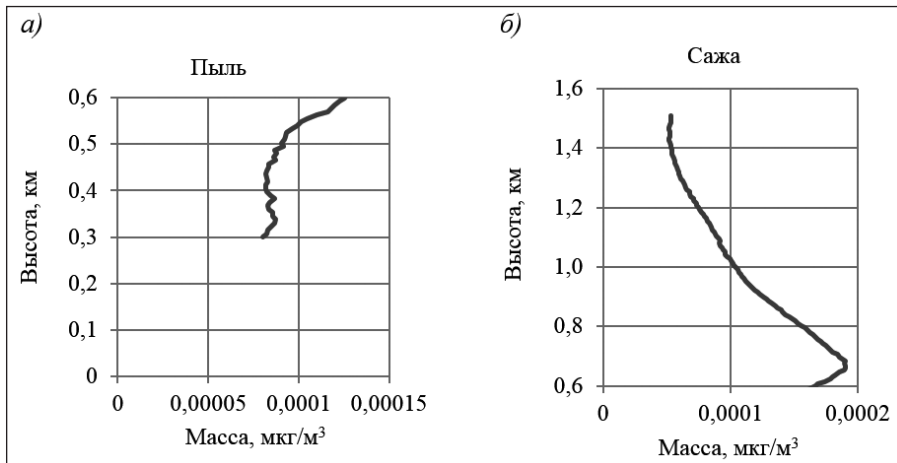


Рис. 6. Вертикальные профили массовой концентрации твердых аэрозолей: а – пылевые; б – сажа (Санкт-Петербург, 27 июля 2016 г.)

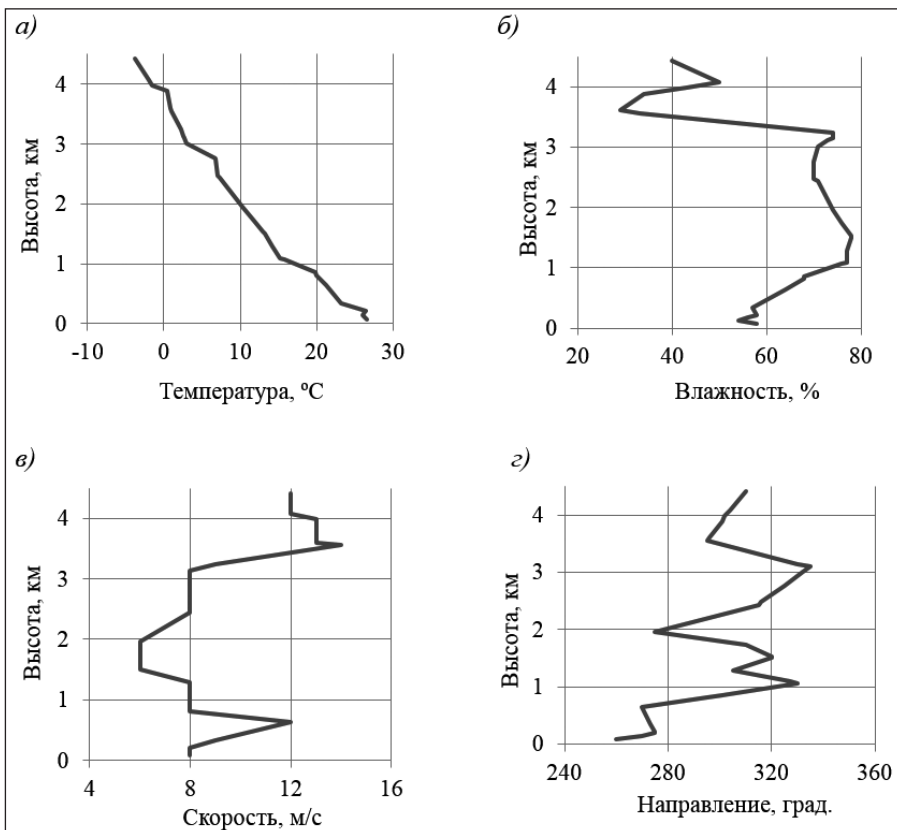


Рис. 7. Вертикальные профили метеопараметров: а – температура; б – относительная влажность; в – скорость ветра; г – направление ветра (пос. Воейково, 27 июля 2016 г.)

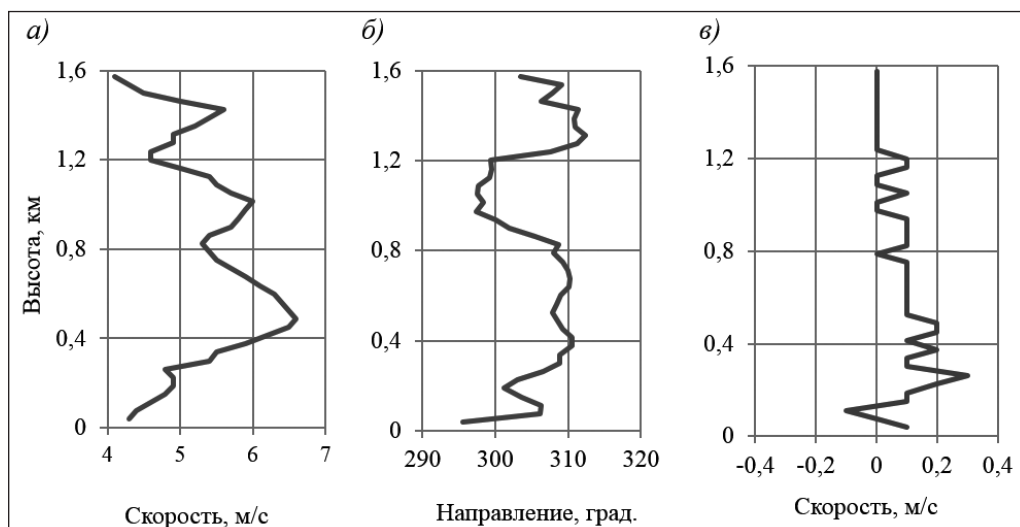


Рис. 8. Вертикальные профили характеристик ветра: а – горизонтальная скорость; б – направление; в – вертикальная составляющая (Санкт-Петербург, 27 июля 2016 г.)

в период проведения зондирования атмосфера характеризовалась высокой влажностью воздуха, изменчивостью ветра и значительными вариациями температурных градиентов. При этом в основном преобладали восходящие движения воздуха. Эти обстоятельства вызвали повышенную атмосферную турбулентность, что отчетливо видно и на рис. 2.

При этом следует отметить, что аэрологическая станция расположена в 25 км от места проведения измерений, и нижние слои атмосферы пригорода и города несколько отличаются по своим характеристикам [6]. Поэтому для анализа характеристик ветра в более высоких слоях атмосферы используются данные метеозонда, а на более низких уровнях – доплеровского лидара [7], входящего в состав стационарного лидарного комплекса (рис. 8).

Доплеровский лидар обладает большей дискретностью по высоте, чем радиозонд, что обеспечивает более детальный профиль ветра, который может обеспечить более точное определение источников атмосферного загрязнения, располагающихся в пределах города. Для определения загрязнителей за пределами города можно воспользоваться моделью HYSPLIT, которая позволяет построить простую траекторию движения воздушных масс на глобальной карте (рис. 9).

Как видно из рис. 9, в день проведения измерений воздушная масса, располагавшаяся на высотах 1000, 1500 и 2000 м, преодолела Финский залив, придя со стороны Балтийского моря. Анализируя такие данные, можно судить о состоянии атмосферы над Финским заливом и Балтийским морем. Однако следует учесть влияние загрязнителей, расположенных в непосредственной близости от места проведения измерений, таких как промышленные суда.

Для решения задач мониторинга судовых выбросов в атмосферу может быть использован мобильный лидарный комплекс. С его помощью проводятся исследования в непосредственной близости от предполагаемых загрязнителей,

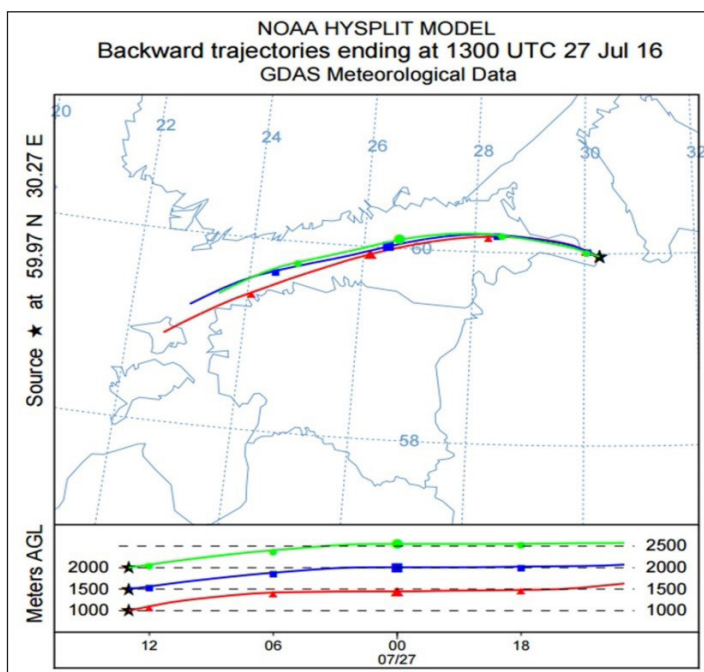


Рис. 9. Траектории движения воздушных масс, достигших Санкт-Петербурга 27 июля 2016 г.

измерения, кроме того, можно осуществлять по наклонным и горизонтальным трассам, что позволяет направить лидар непосредственно на изучаемые выхлопы. Имея данные от каждого загрязнителя, можно исключить смешивание газов при исследовании и проводить анализ для каждого загрязнителя отдельно. С помощью этого подхода предоставляется возможность составлять классификацию источников атмосферного загрязнения, что, в свою очередь, обеспечивает детальный и адекватный прогноз экологически опасных зон и степени экологического риска.

Влияние твердых загрязнений атмосферы на здоровье городского населения

В городах с интенсивной и постоянной шапкой загрязнений наблюдается значительное увеличение заболеваемости органов дыхания и глаз, сердечно-сосудистой системы, отмечаются разного рода аллергические реакции. Влияние аэрозолей характеризуется хроническим действием, то есть постоянное воздействие с течением времени приводит к негативным физиологическим изменениям организма. От такого влияния страдает большинство населения.

Рис. 10 показывает глубину проникновения аэрозольных частиц в зависимости от их диаметра: чем более мелкий аэрозоль, тем глубже он проникает в легкие. Аэрозоль диаметром более 10 мкм осаждается в области носа и горла,

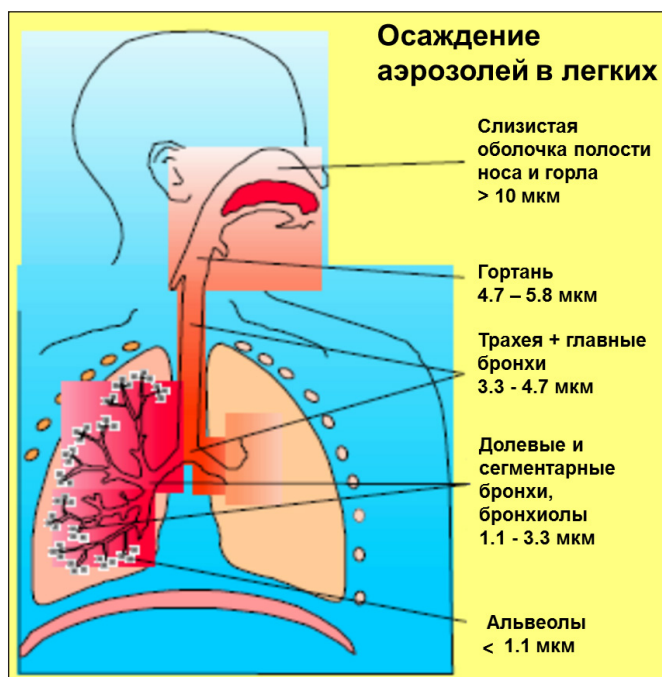


Рис. 10. Осаждение частиц разных размеров в дыхательной системе человека

аэрозоль менее 4 мкм попадает в гортань и основные бронхи и достигает легких. Частицы диаметром менее 1 мкм достигают легочных альвеол.

Исследования [15] указывают на то, что на здоровье в первую очередь оказывают отрицательное воздействие аэрозольные частицы <1 мкм. Так, в исследовании рассматривается влияние аэрозольных частиц диаметром от 0,01 до 2,5 мкм, показано, что такие симптомы, как кашель и ощущение себя больным в течение дня, чаще обнаруживались при наличии самых мелких аэрозольных частиц (0,01–0,1 мкм). Опасность несут и различные частицы металлов, входящие в состав аэрозолей. Так, исследование, опубликованное в 2015 г. [13], показало, что воздействие компонентов твердых частиц, в частности железа, приводит к повышению диастолического артериального давления у детей.

Исследования, проведенные в крупных выборках городского населения Нидерландов с использованием национальной базы данных, показали связь длительного воздействия загрязненного воздуха со смертностью в городских условиях. Была сформирована большая группа 7,1 млн человек в возрасте 30 лет и старше, которая исследовалась в течение семи лет (2004–2011 гг.). По результатам исследований показано, что долгосрочное воздействие твердых мелких частиц воздуха размером меньше PM 10 достоверно повышало смертность от респираторных заболеваний, в том числе от рака легких. Кроме того, частицы размером менее PM 10 связаны со смертностью от сердечно-сосудистых заболеваний [10]. Схожие

выводы сделаны в работе [12], где показано, что долгосрочное воздействие частиц РМ 2,5 и РМ 10 повышает риск инсульта, и представлены доказательства воздействия пыли РМ 2,5–10 из пустыни Сахара на увеличение смертности от сердечных заболеваний. Исследования [9] показали, что РМ 2,5 вносит значительный вклад в инициирование острых сосудистых заболеваний у восприимчивых людей.

Кроме того, загрязнение атмосферы оказывает вредное воздействие на здания и сооружения города, памятники культуры [8], что ведет к увеличению расходов бюджетных средств на их восстановление.

Заключение

Лидарные измерения проводятся с высокой пространственной дискретностью, что способствует детальному исследованию атмосферных слоев и выявлению источников загрязнений. Кроме того, это единственный на данный момент метод дистанционного измерения аэрозолей. При комбинировании лазерного и аэрологического зондирования атмосферы появляется возможность комплексного исследования, дающего информацию не только об аэрозольном составе атмосферы, но и о направлении появления аэрозолей и пути их дальнейшего следования.

В проведенном 27 июля 2016 г. исследовании в Санкт-Петербурге было выявлено, что в течение около 3 ч аэрозольная шапка над городом достигала высоты 2200 м. Несмотря на то что конструктивные особенности телескопа, используемого в исследовании лидара, не позволяют проводить измерения ниже 300 м и благодаря анализу высотно-временной изменчивости оптических коэффициентов было зафиксировано, что аэрозольная шапка обладала как минимум тремя ярко выраженными слоями различной оптической плотности.

Восстановленные по оптическим коэффициентам микрофизические параметры указывают на то, что в атмосфере наблюдалось наибольшее уплотнение частиц на высоте около 750 м. Согласно данным ветрового доплеровского лидара этой высоте соответствует максимальный по скорости ветер, а также имеются деления на три слоя: по скорости (3 пика на профиле) и по направлению. Кроме того, вертикальная составляющая вектора скорости ветра говорит о том, что во время исследования частицы поднимались с нижних слоев атмосферной шапки, это объясняется дневным нагревом почвы (объектов антропогенного происхождения). Модель траектории движения воздушных масс, восстановленная по аэрологическим данным, указывает на то, что происхождение наблюдаемых в исследовании аэрозольных частиц является частично морским.

Лидарное оборудование до сих пор использовалось преимущественно в стационарном режиме, однако мобильная версия РЦ «Обсерватория экологической безопасности» СПбГУ позволяет проводить исследования в любом доступном транспорте месте. При использовании мобильного лидарного комплекса можно исключить фактор смешивания атмосферных примесей от разных источников, проводя исследование непосредственно у источника загрязнений, планировать измерения вне зависимости от направления ветра.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-55-00131 Бел_a – Загрязнения и нагрев атмосферы над мегаполисом на основе моделирования переноса излучения и данных дистанционного зондирования.

Работа была выполнена с использованием оборудования ресурсного центра «Обсерватория экологической безопасности» научного парка СПбГУ.

Литература

1. *Борейшо А.С., Коняев М.А., Морозов А.В., Пикулик А.В., Савин А.В., Трилис А.В., Чакчир С.Я., Бойко Н.И., Власов Ю.Н., Никитаев С.П., Рожнов А.В.* Мобильные многоволновые лидарные комплексы // *Квантовая электроника*. 2005. Т. 12, № 35. – С. 1167–1178.
2. *Волков Н.Н.* Многоволновая лидарная система для определения физических параметров тропосферного аэрозоля: методика расчета параметров и анализа данных: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / МИИГАиК. – М., 2013. – 135 с.
3. *Донченко В.К., Мельникова И.Н., Борейшо А.С., Морозов А.В.* Использование мобильных лидарных комплексов для обратной задачи экологического мониторинга // *Экология и космос*. – СПб.: Петродворец, 2010. – С. 101–110.
4. *Донченко В.К., Самуленков Д.А., Мельникова И.Н., Борейшо А.С., Чугреев А.В.* Лазерные системы Ресурсного центра СПбГУ. Возможности, постановка задач и первые результаты // *Соврем. проблемы дистанц. зондир. Земли из космоса*. 2013. Т. 10, № 3. – С. 122–132.
5. *Ивлев Л.С., Васильев А.В., Белан Б.Д., Панченко М.В., Терпугова С.А.* Оптикомикрофизические модели городского аэрозоля // Третья международная конференция «Естественные и антропогенные аэрозоли». Санкт-Петербург, 24.09–27.09.2001 / под ред. Л.С. Ивлева. – СПб.: НИИ Химии СПбГУ, 2003. – С. 161–170.
6. *Самуленков Д.А., Мельникова И.Н., Сапунов М. В., Донченко В.К., Кузнецов А.Д.* Различия дневных и ночных профилей шапки загрязнений в центре Санкт-Петербурга // *Соврем. проблемы дистанц. зондир. Земли из космоса*. 2015. Т. 12, № 6. – С. 81–96.
7. *Сапунов М.В., Мельникова И.Н., Донченко В.К., Самуленков Д.А., Кузнецов А.Д.* Сопоставление вертикальных профилей скорости и направления ветра, полученных на основе лидарных и аэрологических измерений // *Соврем. проблемы дистанц. зондир. Земли из космоса*. 2015. Т. 12, № 6. – С. 81–96.
8. *Bilenko N., Brunekreef B., Beelen R., Eeftens M., de Hoogh K., Hoek G., Koppelman G. H., Wang M., van Rossem L., Gehring U.* Associations between particulate matter composition and childhood blood pressure – The PIAMA study // *Environment international* No 84. 2015. P. 1–6.
9. *Brook R.D., Shin H.H., Bard R.L., Burnett R.T., Vette A., Croghan C., Thornburg J., Rodes Ch., Williams R.* Exploration of the Rapid Effects of Personal Fine Particulate Matter Exposure on Arterial Hemodynamics and Vascular Function during the Same Day // *Environmental Health Perspectives*. V. 119. № 5. 2011. P. 432–444.
10. *Fischer P.H., Marra M., Ameling C.B., Gerard H., Beelen R., de Hoogh K., Breugelmans O., Kruize H., Janssen N. A.H., Houthuijs D.* Air Pollution and Mortality in Seven Million Adults: The Dutch Environmental Longitudinal Study (DUELS) // *Environmental Health Perspectives*, V. 123, No. 7, 2015, P. 697.
11. *Hoffmann B., Weinmayr G., Hennig F., Fuks K., Moebus S., Weimar Ch., Dragano N., Hermann D.M., Kälisch H., Mahabadi A.A., Erbel R., Jöckel K.-H.* Air Quality, Stroke and Coronary Events. Results of the Heinz Nixdorf Recall Study From the Ruhr Region // *Deutsches Ärzteblatt International*. 2015. 112. P. 95–201.
12. *Mallone S., Stafoggia M., Faustini A., Gobbi G.P., Marconi A., Forastiere F.* Saharan Dust and Associations between Particulate Matter and Daily Mortality in Rome, Italy // *Environmental Health Perspectives*. V. 119. № 10. 2011. P. 875–888.
13. *Tzanis C., Varotsos C., Christodoulakis J., Tidblad J., Ferm M., Ionescu A., Lefevre R.-A., Theodorakopoulou K., Kreislova K.* On the corrosion and soiling effects on materials by air pollution in Athens, Greece // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 12/2011; 11:12039–12048. DOI: 10.5194/acp-11-12039-2011.
14. *Veselovskii I., Whiteman D.N., Kolgotin A., Andrews E., Korenskii M.* Demonstration of aerosol property profiling by multi-wavelength lidar under varying relative humidity conditions // *J. of Atmospheric and Oceanic Tech.* 2009. Vol. 26. P. 1543–1557.
15. *Wichmann H.-E., Kohmanns B., Koller U., Klemmer A., Haury H.-J. (Eds.)* Neueste Erkenntnisse zur Wirkung von Luftschadstoffen auf unsere Gesundheit // *Macht uns die Umwelt krank? // GSF-Bericht* 7/96. P. 37–38.