## Различие дневных и ночных профилей шапки загрязнений в центре Санкт-Петербурга

Д.А. Самуленков<sup>1</sup>, И.Н. Мельникова<sup>1</sup>, М.В. Сапунов<sup>1</sup>, В.К. Донченко<sup>1</sup>, А.Д. Кузнецов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет Санкт-Петербург, 199034, Россия E-mail: irina.melnikova@pobox.spbu.ru <sup>2</sup> Российский государственный гидрометеорологический университет Санкт-Петербург, 195196, Россия E-mail: kuznetsov1946@inbox.ru

Описан лидарный комплекс Санкт-Петербургского государственного университета, расположенный в центре Санкт-Петербурга на Васильевском острове, и обозначены цели и основные задачи проведения лидарного мониторинга. Представлены результаты измерений, проведенных 5 марта 2015 г.: вертикальный профиль коэффициента экстинкции атмосферных аэрозолей в УФ спектральном канале (355 нм) и в видимом канале (532 нм), полученный в течение 3 часов в дневное и ночное время. Получены также вертикальные профили концентрации частиц, среднего радиуса частиц, мнимой и действительной частей показателя преломления. Все эти параметры помогают сделать заключения о природе аэрозольных частиц в приземном слое атмосферы над городом, которые характеризуют вертикальную структуру и динамику трансформации шапки загрязнений в условиях мегаполиса на примере Санкт-Петербурга. Сравниваются результаты лидарного зондирования в центре Санкт-Петербурга в дневное и ночное время и вертикальные профили вариаций параметров атмосферных твердых примесных частиц в шапке загрязнений над городом. Для понимания особенностей формирования городской шапки загрязнений представлены вертикальные профили метеопараметров по данным радиозондирования, которое выполняется в п. Воейково (25 км от места лидарного зондирования) 2 раза в сутки. Проведен анализ влияния профилей ветра, температуры и влажности в атмосфере на свойства и динамику твердых примесей. Выявлены преимущественные направления и скорость распространения загрязняющих примесей на Васильевском острове Санкт-Петербурга на разных высотах. Показано, что метеорологические параметры атмосферы и время суток влияют на динамику изменений шапки загрязнений над городом.

**Ключевые слова:** экологическая безопасность, экологический мониторинг атмосферы, лидарное зондирование, лазерный комплекс, метеопараметры, загрязнение атмосферы, влияние на здоровье населения

#### Введение

Для оперативного выявления фактов загрязнения атмосферы применяется лидарный мониторинг состояния атмосферного воздуха (Донченко и др., 2010). Применение дистанционного зондирования атмосферы на базе оптико-электронных и лазерно-локационных методов диагностики газово-аэрозольного состава окружающей среды открывает новые перспективы в исследованиях, связанных с экологической безопасностью и служат для выявления потенциально опасных явлений и объектов (Melnikova et al., 2010).

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. Кроме того высокое содержание частиц пыли, сажи увеличивает поглощение солнечной радиации в приземном слое атмосферы, что ведет к увеличению приземной температуры. Таким образом, мощная шапка загрязнений в приземном слое атмосферы, повышенная температура воздуха у поверхности в летнее время и возникновение смога в результате фотохимических реакций создают неблагоприятные условия для здоровья населения (Sugimoto et al., 2014). Поэтому в городах с интенсивной и постоянной шапкой загрязнений наблюдается увеличение заболеваемости органов дыхания и глаз, сердечно-сосудистых заболеваний, отмечаются аллергические реакции разного рода. 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, возрастом 30 лет и старше, которая исследовалась в течение семи лет (2004-2011 гг.). По результатам исследований (Fischer et al., 2014), показано, что долгосрочное воздействие твердых мелкодисперсных частиц в воздухе размером меньше 10 мкм (PM<sub>10</sub>) и менее 2,5 мкм (РМ<sub>2,5</sub>), которые образуются в городе при движении транспорта, достоверно повышало смертность от респираторных заболеваний, в том числе от рака легких. Кроме того, частицы РМ<sub>10</sub> и РМ<sub>25</sub> связаны со смертностью от сердечно-сосудистых заболеваний (Hoffmann et al., 2015). Схожие выводы сделаны в работе (Mallone et al., 2011), где показано, что присутствие в атмосфере частиц PM<sub>2.5</sub> и PM<sub>10</sub>, повышает риск инсульта. В то же время, авторы (Mallone et al., 2011) представили доказательства воздействия пыли PM<sub>2.5-10</sub> из пустыни Caxapa на увеличение смертности от сердечных заболеваний, а исследования (Brook et al., 2011) показали, что РМ<sub>2,5</sub> вносят значительный вклад в инициирование острых сосудистых заболеваний.

Загрязнение атмосферы также оказывает вредное воздействия на здания и сооружения города, памятники культуры (Tsanis et al., 2011), что ведет к увеличению расходования бюджетных средств на их восстановление. Поэтому исследование условий формирования шапки загрязнений, динамика ее трансформации в зависимости от времени суток и метеорологических условий (в частности от направления и скорости ветра) является важной задачей. В данной работе предпринят предварительный анализ результатов лидарного зондирования в центре Санкт-Петербурга в дневное и ночное время, включающих вертикальные профили вариаций параметров атмосферных твердых аэрозольных частиц в шапке загрязнений над городом, совместно с анализом профилей метеорологических параметров по данным радиозондирования в п. Воейково – пригороде Санкт-Петербурга, для возможности выявления связей между состоянием атмосферы и формированием городской шапки загрязнений. Кроме того, результаты лидарного зондирования способствуют построению оптических моделей атмосферы, необходимых в задачах дистанционного зондирования и атмосферной коррекции.

#### Материалы и методы

В Санкт-Петербургском государственном университете (СПбГУ) создан Ресурсный центр «Обсерватория экологической безопасности», оснащенный лидарными системами для мониторинга динамики и распространения загрязнений над центром города.

Стационарный лидарный комплекс включает в свой состав аэрозольный Nd:YAG лидар (355, 532, 1064 нм); и доплеровский ветровой лидар. Преимущество лидарных систем заключаются в объединении различных методик и приборов в единый комплекс.

Характеристики аэрозольного и доплеровского лидаров описаны в (Донченко и др., 2013). Лидарный комплекс включает в себя алгоритмы и программное обеспечение для обработки сигнала лазера, рассеянного назад и принятого телескопом лидара, на основе лидарного уравнения. Повторяемость импульсов аэрозольного лазера 20 Гц. В программах предусмотрено определение объемных коэффициентов ослабления и обратного рассеяния в трех спектральных каналах. Здесь поясним, что объемный коэффициент ослабления  $\alpha$  (1/км) определяется обычным образом, а коэффициент обратного рассеяния  $\beta$  (1/(км стер)) связан с принятыми в теории переноса излучения и теории рассеяния оптическими параметрами следующим образом:  $\beta = \sigma \chi (180^\circ) d\Omega$ , где  $\sigma$  – объемный коэффициент рассеяния,  $\chi (180^\circ)$  – значение индикатрисы рассеяния назад (в направлении 180°),  $d\Omega$  – элемент телесного угла, в котором происходит рассеяния, на котором происходит рассеяние лидарного импульса).

Вычисление коэффициентов ослабления и обратного рассеяния аэрозоля из данных лидарного зондирования (обращение лидарного уравнения) выполнено по методу Клетта (Klett, 1985). Лидарное отношение выбрано равным 40. Соответствующие формулы приведены в работах (Донченко и др., 2013) и (Veselovskii et al., 2009). Погрешности определения объемных коэффициентов ослабления и обратного рассеяния по методу Клетта составляют 20-30% (Klett, 1985; Althausen et al., 2000; Волков, 2013) в зависимости от состояния атмосферы, типа и количества аэрозолей. Дискретность результатов по высоте 7,5 м. Дальность зондирования также определяется условиями в атмосфере. Во многих публикациях при определении профиля параметров аэрозолей с помощью лидаров используют термин «профайлинг», подчеркивая сложную зависимость погрешностей восстановления и отличие лидарных методов от других измерений (можно отметить, что вертикальный профиль аэрозолей и его изменчивость другими методами не удается определить столь же детально). Результаты приводятся в динамике изменений вертикальных профилей коэффициентов ослабления и обратного рассеяния на цветных изображениях. Следующий уровень обработки на основе усредненных по времени вертикальных профилей коэффициентов ослабления и обратного рассеяния позволяет определить вертикальные профили содержания аэрозолей, распределение частиц по размерам на выбранных уровнях по высоте, вертикальные профили среднего и среднего квадратичного радиуса, действительной и мнимой частей показателя преломления. При восстановлении оптических параметров и характеристик атмосферных аэрозолей программы обработки дают среднюю невязку результата до 50%. Время усреднения выбирается оператором в зависимости от изменчивости или стабильности атмосферных условий. Использование поляризационных фильтров дает возможность получить вертикальный профиль фактора линейной и объемной деполяризации, который указывает на отличие формы частиц от сфероида (частицы песка, ледяные кристаллы).

Измерения проводились в будние дни при безоблачном небе или с облачностью низкой бальности. По понедельникам и четвергам наблюдения выполняются в дневное и ночное время, каждый сеанс длится не менее 2 часов, что соответствует требованиям Европейской лазерной сети (EARLINET), в которую ассоциирована лидарная станция СПбГУ.

Ветровой допплеровский лидар (Мельникова и др., 2010) может быть использован как при ясном небе, так и в условиях облачной атмосферы (но в отсутствие осадков). Он обеспечивает определение вертикального профиля горизонтальной и вертикальной составляющей скорости и направления ветра (указывая также направление и скорость распространения загрязнений). Подробности об измерениях ветра на лидарной станции излагаются в статье в настоящем журнале (Сапунов и др., в печати).

Удачное расположение стационарного лидарного комплекса в центре города (В.О., 10 линия, дом 33/35, географические координаты: 59,943 с.ш., 30,273 в.д. и на высоте над уровнем моря 35 м (*puc. 1*)) позволяет проводить постоянные мониторинговые измерения в условиях значительного загрязнения, типичных для мегаполиса (Борейшо и др., 2005; Донченко и др., 2013).

# Результаты лидарного мониторинга атмосферного загрязнения в центре Санкт-Петербурга

На *рис. 1* показана изменчивость вертикального профиля коэффициента ослабления в двух спектральных каналах: 355 и 532 нм по измерениям 01.08.2014 в дневное время.



Рис. 1. Динамика трансформации вертикального профиля коэффициента ослабления УФ (355 нм) и видимом (532 нм) спектральных каналах (01.08.2014) в дневное время (с 12:45 до 14:45 местного времени)

В УФ канале особенно заметно увеличение коэффициента ослабления по сравнению с видимым каналом, что свидетельствует об увеличении концентрации мелких аэрозольных частиц в нижнем слое (до 500 м) шапки загрязнений в период с 13 до 14 часов. В видимом канале коэффициент ослабления в слое ниже 500 м меньше, чем в слое 500–1000 м. После 14:00 коэффициент ослабления (экстинкции) уменьшается, а верхняя граница шапки загрязнений поднимается до 1800 м, что хорошо выражено в видимом канале.

На *рис. 2* и *3* представлен вертикальный профиль коэффициента экстинкции по результатам лидарного зондирования в дневное и ночное время в спектральных каналах 355 и 532 нм по измерениям 04.08.2014. Измерения проводились в течение 3-х часов в дневное время (с 10:30 до 13:30 часов) и в ночное время (с 23:30 до 2:30 часов) суток.



Рис. 2. Динамика трансформации вертикального профиля коэффициента ослабления в УФ спектральном канале 355 нм (04.08.2014): а – день (с 10:30 до 13:30 местного времени), б – ночь (с 23:30 до 2:30 местного времени)



Рис. 3. Динамика трансформации вертикального профиля коэффициента ослабления в видимом спектральном канале 532 нм (04.08.2014): а – день (с 10:00 до 14:00 местного времени), б – ночь (с 23:30 до 2:15 местного времени)

Ночью величина приземного максимума коэффициента ослабления такая же: α=0,25 1/км, но слой значительно тоньше – до высоты 400 м – и постепенно ослабляется к 2 часам ночи. На рисунках, показывающих коэффициент ослабления в видимом канале, заметны горизонтальные слои неоднородного распределения загрязнений. Более ярко выраженный слой загрязнений в УФ канале указывает на содержащиеся в нем мелкие частицы с радиусом менее 1 мкм.

На *рис.* 4 показаны усредненные за время наблюдений коэффициенты обратного рассеяния  $\beta$  в дневное (а) и в ночное время (б). Интересно, что в УФ и видимом каналах как в дневное, так и в ночное время вертикальный профиль оптических параметров мало меняется, только в ночное время появляются более явно выраженные максимумы коэффициента обратного рассеяния на высотах 1600 и 2700 м. В ближнем ИК канале профиль коэффициента обратного рассеяния различается кардинально в дневное и в ночное время, что указывает на изменение размеров загрязняющих частиц.



Рис. 4. Вертикальный профиль коэффициента обратного рассеяния, усредненного за время наблюдений в дневное время 01.08.2014 и в ночное время 04.08.2014. Фиолетовая линия – УФ канал 355 нм, зеленая – видимый канал, 532 нм, красная линия – канал 1064 нм

Значения коэффициентов ослабления и обратного рассеяния в спектральных каналах 355, 533 и 1064 нм позволяют восстановить микрофизические характеристики частиц: распределение частиц по размерам, средний и эффективный радиусы частиц, их концентрацию на разных высотах.

*Рисунок 5* демонстрирует изменение функции распределения частиц по размеру с высотой. Значения высот указаны на рисунке. Видно, что суммарный объем частиц уменьшается с высотой примерно в 30 раз. На большей высоте доля крупных частиц (> 4 мкм) становится меньше. В дневное время распределение частиц двухмодальное, что особенно заметно на низких высотах ниже 700 м. До 1 километра по высоте сохраняется мода крупных частиц, хотя их суммарный объем значительно уменьшается. Выше и в ночное время преобладают мелкие частицы с размером около 0,1 мкм, что хорошо видно на вертикальном профиле среднего радиуса на *рис. 6б*.

*Рисунок ба* представляет вертикальные профили содержания аэрозольных частиц в 1 см<sup>3</sup> в дневное и ночное время 04.08.2014 и по измерениям 01.08.2014. Профиль концентрации частиц в атмосфере 01.08.2014 гладкий, концентрация плавно убывает с высотой в слоях выше 500 м. В нижних 300 м происходит сильное уменьшение количества частиц. Вертикальная зависимость среднего радиуса частиц для измерений 01.08.2014 на *рис. бб* в нижней части атмосферы демонстрирует значительное увеличение размеров частиц.

Вертикальные зависимости концентрации и среднего радиуса частиц, полученных из измерений 04.08.2014 демонстрируют заметные вариации величин на высотах 1000–2000 м. В целом ход концентрации частиц с высотой мало отличается в дневное и ночное время, за исключением более выраженной стратификации слоев ночью с небольшими максимумами на высотах 1600 и 2700 м.



Рис. 5. Распределение частиц (объемное) по размерам в приземном слое и на верхней границе шапки загрязнений; высоты уровней в метрах указаны на рисунках



Рис. 6. Вертикальные профили а) – концентрации частиц и б) – среднего радиуса частиц. Черная линия – в дневное время, 01.08.2014; красная линия – в дневное время 04.08.2014; синяя линия – в ночное время 04.08.2014

Особенностью профилей 04.08.2014 является плавное убывание количества частиц до высоты 1 км. Здесь также не отмечается большой разницы в размерах частиц, однако в ночное время средний размер частиц в приземном слое до высоты 1 км уменьшается на 10% по сравнению с дневными измерениями, что, по-видимому, связано с оседанием более крупных частиц и с ослаблением автомобильного движения в ночное время суток. Выше, в слое 1-2 км, видны резкие вариации количества частиц и менее выраженные вариации размеров частиц. Следует отметить, что концентрация частиц ночью в нижнем слое увеличилась на 2500 1/см<sup>3</sup>, причем за счет более мелких частиц. На *рис.* 8 приведены значения действительной (а) и мнимой (б) частей показателя преломления в дневное (красная линия) и ночное (синяя линия) время над городом. Однако вертикальная зависимость действительной части показателя преломления днем 01.08.2014 демонстрирует рост с высотой от 1,47 на 300 м до 1,58 на 1 км. Значения 1,47 близки к показателю преломления мелких капель серной кислоты. На этих же высотах аэрозольные частицы характеризуются уменьшением концентрации и увеличением размеров – возможно, это связано с обводнением частиц. Вертикальная зависимость параметров, полученных из измерений 04.08.2014, похожа на случай 01.08.2014, но менее выражена. Мнимая часть в ночное время на 25% отличается по величине от профиля в дневное время ниже 2 км, а выше меняется соотношение дневных и ночных значений, разница меняет знак и уменьшается до 10%. В среднем значения параметров на рис. 7 характерны для минерального пылевого аэрозоля (Ивлев и др., 2003; Креков, Рахимов, 1982; Sokolik, Toon, 1999). Разница величин в дневное и ночное время в нижнем слое 04.08.2014 (красная и синяя линии), возможно, вызывается изменениями влажности воздуха в течение суток. Как подчеркивается в книге (Креков и Рахимов, 1982), городской пылевой аэрозоль очень разнообразен по составу и по вариациям значений комплексного показателя преломления. Обратим внимание на явно выраженные максимумы действительной части показателя преломления на высотах 1600 и 2700 м, где обнаруживается увеличение коэффициента ослабления и концентрации аэрозолей. Более подробное исследование может обеспечить оценку вклада различных компонентов в пылевой городской аэрозоль (Креков, Рахимов, 1982).



Рис. 7. Вертикальные профили действительной и мнимой части показателя преломления. Черная линия — в дневное время, 01.08.2014; красная линия — в дневное время 04.08.2014; синяя линия — в ночное время 04.08.2014

#### Результаты измерения метеорологических характеристик

Для лучшего понимания влияния температуры и влажности атмосферы на формирование шапки загрязнений над городом приведем вертикальные профили влияния метеорологических параметров. В п. Воейково, Ленинградская область, на расстоянии 25 км от места лидарных измерений регулярно дважды в сутки выполняются запуски радиозондов. В каждом запуске по мере полета радиозонда измеряются температура, влажность, давление, скорость и направление ветра.

Вертикальные профили в дневное и ночное время, полученные из данных радиозондирования, приведены на *рис.* 8–11.



Рис. 8. Вертикальные профили температуры и влажности по результатам аэрологического зондирования 01.08.2014 в 15:00

Измерения характеристик ветра – горизонтальной и вертикальной составляющих скорости ветра и направление ветра – проводились также с помощью ветрового доплеровского лидара, и результаты лидарных измерений показаны на рисунках. Положительные значения вертикальной составляющей скорости ветра соответствуют восходящим потокам воздуха, а отрицательные – нисходящим движениям. Напомним, что лидарные измерения проводились 01.08.2014 только в дневное время, а 04.08.2014 и в дневное и в ночное время. Соответственно, для тех же периодов времени представлены результаты радиозондирования.

Результаты измерений аэрологическими зондами, которые запускаются в поселке Воейково, позволяют получить вертикальные профили направления и скорости ветра, температуры, влажности и других метеопараметров на высотах от земли до 35–40 км, с переменной дискретностью по высоте от 50 до 350 м.



Рис. 9. Вертикальные профили скорости (а) и направления (б) ветра по измерениям 01.08.2014. Зеленая линия по данным аэрологического зондирования, синяя – лидара; красная линия на рисунке 9а – вертикальная составляющая скорости ветра по лидарным данным

Все данные аэрологического зондирования поступают во Всемирную Метеорологическую Организацию и хранятся в свободном доступе. Определение скорости и направления ветра при аэрологическом зондировании осуществляется путем детектирования координат радиозонда в момент очередной отправки данных с дальнейшим расчетом пути пройденного им между текущей отправкой данных и предыдущей и затраченным на это временем.



Рис. 10. Вертикальные профили (a) – температуры и (б) – влажности в дневное и ночное время 04.08.2014 по данным аэрологического зондирования, сплошная линия – в дневное время и пунктирная линия в ночное время

Сравнение лидарных и аэрологических данных измерений характеристик ветра не на всех высотах демонстрирует совпадение значений. Это можно объяснить как реальной разницей, связанной с расстоянием между точками измерений и разными природными условиями (рельефом местности, зданиями в городе, близостью к обширной водной поверхности Финского залива), так и различием методов измерений и разным усреднением ветровых характеристик при измерениях. Подробнее этот вопрос рассмотрен в другой работе авторов, принятой к печати в этом же журнале (Сапунов и др., в печати).

Вертикальные составляющие скорости ветра по лидарным данным представлены на *рис. 116* красными линиями (сплошная линия в дневное время и пунктирная – в ночное). Видно, что 04.08.2014 были зафиксированы только восходящие движения воздуха. Высокая температура в приземном слое днем 04.08.2014 привела к нагреву поверхности и восходящим потокам воздуха, особенно заметным днем, но сохраняющимся и ночью (красные линии на *рис. 116*). Максимумы горизонтальной скорости ветра до 8 м/сек наблюдаются ночью на высотах около 300 м и 3700 м. Заметные сдвиги ветра по высоте на *рис. 116* могут объясняться погрешностями измерений из-за малых скоростей ветра и вертикальных движений.



Рис. 11. Вертикальные профили направления (а) и скорости (б) ветра по данным аэрологического зондирования 04.08.2014. Штриховая линия – в дневное время, сплошная линия – в ночное; по лидарным данным синяя – день, зеленая – ночь; красные линии – вертикальная скорость

### Обсуждение результатов

На профилях температуры, полученных 01.08.2014, видны температурные инверсии, расположенные в слоях 800–1000 м, 1100–1300 м и 2000–2300 м. Наличие первой инверсии, которую можно рассматривать как запирающий вертикальную конвекцию слой, может

приводить к повышению концентрации аэрозоля до высот 800 м. Такой характер вертикального профиля температуры нашел свое отражение в поведении черной кривой на *рис. 6a*, описывающей вертикальный профиль концентрации аэрозольных частиц днем 01.08.2014, где отчетливо прослеживается повышение концентрации частиц в 1 см<sup>3</sup> от поверхности земли до высоты 800 м.

Температурная стратификация атмосферы 04.08.2014 выражена сильнее как в дневное, так и в ночное время. В дневное время у вертикального профиля температуры имеются две инверсии: 400–700 м и 950–1050 м. В ночное время наблюдаются изотерма от поверхности земли до высоты 450 м и два слоя температурной инверсии: 450–550 м и 950–1050 м. Такой характер высотной изменчивости температуры воздуха позволяет предположить, что накопление концентрации частиц будет происходить от поверхности земли до высоты порядка 400–450 м.

Профиль влажности по измерениям 01.08.2014 демонстрирует сильный минимум на высоте 2200 м, возможно связанный с максимумом температуры, сдвигом ветра на 20° и максимумом скорости ветра на этой же высоте.

Стратификация коэффициента обратного рассеяния 04.08.2014 как в дневное, так и в ночное время (*puc. 5*) указывает на заметные максимумы на высотах 1600 и 2700 м, которые коррелируют с экстремумами влажности в атмосфере.

На высотах 1600 и 2700 м, где выявлены максимумы содержания аэрозолей и увеличение действительной части показателя преломления (что указывает на вариации состава аэрозолей), не наблюдается температурной стратификации. Однако на этих высотах следует отметить сдвиг ветра в северо-восточном направлении на 20° и на 40° по сравнению с другими высотами. Может быть, именно ветер с северо-востока и востока перенес аэрозольные частицы иного типа. Тогда можно предположить, что коэффициент ослабления в пограничном слое в рассматриваемом случае формировался за счет разных аэрозольных компонент в дневное и ночное время на разных высотах.

В приведенных метеоданных 04.08.2014 наблюдается естественное уменьшение температуры в приземном слое в ночное время, а также увеличение влажности ночью. Возможно, что увеличение в нижнем слое атмосферы количества частиц в ночное время на 25% и уменьшение их радиуса на 10%, а также рост мнимой части показателя преломления на 25% вызваны увеличением в атмосфере количества мелких сажевых частиц. Как показано в работе (Михайлов, Власенко, 2007), сажевые мелкие частицы во влажной и слабо-кислой атмосфере значительно увеличиваются в размерах и более эффективно поглощают солнечную радиацию.

Характеристики ветра 04.08.2014 показывают менее стабильную атмосферу по сравнению с 01.08.2014, что находит отражение в более заметных вертикальных движениях атмосферы, в более выраженной температурной стратификации и более заметной неоднородности распределения атмосферных аэрозолей. Направление ветра преимущественно восточного направления весьма значительно меняется с высотой (на 60–80°), сдвигаясь в ночное время примерно на 40° к югу на малых высотах. Колебания скорости ветра с высотой также довольно значительны (до 10 м/с) и максимальны (до 15 м/с) на высотах 500 м и 3500 м. Можно отметить, что именно заметные вертикальные движения в нижнем слое атмосферы вызвали сложную вертикальную структуру аэрозолей на *рис.* 2 в дневное и в ночное время.

В статье (Гинзбург и др., в печати) показано, как данные аэрозольного зондирования используются для построения оптических моделей атмосферы, что востребовано во многих задачах дистанционного зондирования для определения свойств атмосферы и поверхности по данным спутниковых и других измерений.

#### Выводы

Сопоставление динамики трансформации шапки загрязнений над центром Санкт-Петербурга совместно с вариациями метеопараметров способствует выяснению особенностей формирования шапки загрязнения над городом. Лидарное зондирование атмосферы в районе Васильевского острова, проводившееся в трех спектральных каналах в течение трех часов в дневное, а 4 августа еще и в ночное время, дает возможность наглядно представить сложную структуру аэрозольных слоев над городом. Результаты измерений 1 и 4 августа 2014 г. показывают их значительную изменчивость в течение суток. На основе полученных вертикальных профилей было выполнено восстановление функции распределения аэрозольных частиц по размерам на нескольких высотах от 300 до 4500 м, включающих пограничный слой с шапкой загрязнений (от 300 до 1800 м) и незагрязненную атмосферу (от 2000 до 4500 м), что указывает на оседание более крупной фракции аэрозолей в ночное время. Вертикальные профили среднего размера частиц, счетной концентрации частиц и комплексного показателя преломления демонстрируют изменчивость с высотой, превосходящую погрешности измерений. Сравнение с вертикальными профилями метеопараметров из данных радиозондирования указывает на значительное влияние температуры на содержание аэрозольных частиц в слоях инверсии. В свою очередь, значительная температурная стратификация вызвала заметные вертикальные движения и распространение аэрозолей по высоте, что отражается на рис. 2 и 3 (заметная вертикальная структура в нижних слоях атмосферы). Влажность в некоторых случаях регулирует размер частиц, что зависит в свою очередь от природы аэрозолей.

Для более строгих заключений необходимо накопить больше данных, рассмотреть случаи с близкими метеоусловиями и статистически обработать результаты для выявления закономерностей взаимного влияния профилей температуры, влажности, ветра и содержания атмосферных аэрозолей.

В заключение авторы выражают благодарность коллегам, сделавшим полезные замечания и задавшим точные вопросы при обсуждении работы на симпозиуме MCAPД2015, рецензенту, который не только внимательно изучил представленную для публикации рукопись, но дал много советов по улучшению изложения и представления материала.

Мы благодарны поддержке работы в рамках следующих проектов.

– Государственный контракт № 16.740.11.0619 от 31 мая 2011 г. «Разработка методов исследования физических процессов формирования загрязнения атмосферы дымами и смогом».

- Соглашение № 14.В37.21.1528 от 01.10.2012 г. «Моделирование процессов формирования и динамики полей атмосферного аэрозоля, образовавшихся в результате лесных пожаров, для оперативного прогнозирования состояния атмосферы и изучения регионального климата».

- Соглашение №14.574.21.0088 от 16.07.2014 г. (тема: «Проведение прикладных научных исследований по разработке автоматизированной информационной системы мониторинга и прогноза баланса ливневых стоков для городских систем водоотведения») в рамках реализации федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 гг.» (Уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57414X0088).

## 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.
- Волков Н.Н. Многоволновая лидарная система для определения физических параметров тропосферного аэрозо-2. ля: методика расчета параметров и анализа данных. Дисс. Канд. технических наук. МИИГАиК. М. 2013. 135 с.
- Гинзбург А.С., Мельникова И.Н., Самуленков Д.А., Сапунов М.В., Катковский Л.В. Простая оптическая 3. модель безоблачной и облачной атмосферы для расчета потоков солнечной радиации // Современные про-
- блемы дистанционного зондирования Земли из космоса (в печати). Донченко В.К., Мельникова И.Н., Борейшо А.С., Морозов А.В. Использование мобильных лидарных ком-плексов для обратной задачи экологического мониторинга // Сборник «Экология и космос», Санкт-Пе-4. тербург. 2010. С. 101–110.
- Донченко В.К., Самуленков Д.А., Мельникова И.Н., Борейшо А.С., Чугреев А.В. Лазерные системы Ресурс-5. ного центра СПбГУ. Возможности, постановка задач и первые результаты // Современные проблемы дис-танционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 3. С. 122–132. Ивлев Л.С., Васильев А.В., Белан Б.Д., Панченко М.В., Терпугова С.А. Оптикомикрофизические модели го-
- 6. родского аэрозоля // В сб. «Третья международная конференция Естественные и антропогенные аэрозоли. Санкт-Петербург, 24.09-27.09.2001». Ред. Л.С. Ивлев. НИИ Химии СПбГУ. 2003. С. 161-170.
- *Креков Г.М., Рахимов Р.Ф.* Оптико-локационная модель континентального аэрозоля. «Наука CO» Новосибирск, 1982. 200 с. 7.
- Михайлов Е.Ф., Власенко С.С. Структура и оптические свойства сажевых аэрозолей во влажной атмосфе-8. ре: 2. Влияние гидрофильности частиц на коэффициенты ослабления, рассеяния и поглощения // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. № 2. С. 221–233. Сапунов М.В., Мельникова И.Н., Донченко В.К., Самуленков Д.А., Кузнецов А.Д. Сопоставление вертикаль-
- 9 ных профилей скорости и направления ветра, полученных на основе лидарных и аэрологических измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (в печати).
- Althausen D., Müller D., Ansmann A., Wandinger U., Hube, H., Clauder, E., Zoerner, S. Scanning 6-wavelength 11-channel aerosol lidar // J. Atmospheric and Oceanic Technol. 2000. No. 17. P. 1469–1482.
   Brook Robert D., Shin Hwashin H., Bard Robert L., Burnett Richard T., Vette Alan, Croghan Carry, Thornburg Jonathan, Rodes Charles, Williams Ron. Exploration of the Rapid Effects of Personal Fine Particulate Matter Exposure on Artarial Homedmannia and Vacuular Eventian during the Same Der (17). Exposure on Arterial Hemodynamics and Vascular Function during the Same Day // Environmental Health Perspectives. Vol. 119. No. 5. 2011. P. 432–444.
  12. Fischer Paul H., Marra Marten, Ameling Caroline B., Gerard Hoek, Beelen Rob, de Hoogh Kees, Breugelmans Oscar,
- Kruize Hanneke, Janssen Nicole A.H., Houthuijs Danny. Environmental Health Perspective Air Pollution and Mortality in Seven Million Adults: The Dutch Environmental Longitudinal Study (DUELS) // Doi: 10.1289/ehp.1408254
- Hoffmann Barbara, Weinmayr Gudrun, Hennig Frauke, Fuks Kateryna, Moebus Susanne, Weimar Christian, Dragano Nico, Hermann Dirk M., Kälsch Hagen, Mahabadi Amir A., Erbel Raimund, Jöckel Karl-Heinz. 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.
- 14. Klett, J.D. Lidar inversion with variable backscatter/extinction ratios // Applied Optics, Vol. 24, 1985, pp. 1638–1643. 15. Mallone Sandra, Stafoggia Massimo, Faustini Annunziata, Gobbi Gian Paolo, Marconi Achille, Forastiere Francesco. Saharan Dust and Associations between Particulate Matter and Daily Mortality in Rome, Italy // Environ-
- mental Health Perspectives. Vol. 119. No. 10. 2011. P. 875–888. *Melnikova I., Donchenko V., Boreisho A., Morozov A.* Laser Complexes for the Solution of the inverse Problem of Ecological Monitoring // Proceedings of the 25th International Laser Radar Conference, 5–9 July 2010, St.-Petersburg, Russia. 2010. P. 131–133.
- Sokolik I.N., and Toon O.B. Incorporation of mineralogical composition into models of the radiative properties of 17. mineral aerosol from UV to IR wavelengths // J. Geophys. Res. 1999. Vol.104. P. 9423-9444 .

- 18. Sugimoto Nobuo, Nishizawa Tomoaki, Shimizu Atsushi, Matsui Ichiro, Jin Yoshitaka. Current status of the Asian Dust and aerosol lidar observation network (AD-NET) // ACTRIS WP2WP20 workshop, Oct. 28-31, 2014. Lille, France.
- 19. 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; 11:1203912048. DOI: 10.5194/acp-11-12039-2011.
- 20. 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.

## Difference of day and night profiles of the pollution cap in the center of St. Petersburg city

#### D.A. Samulenkov<sup>1</sup>, I.N. Melnikova<sup>1</sup>, M.V. Sapunov<sup>1</sup>, V.K. Donchenko<sup>1</sup>, A.D. Kuznetsov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> St.Petersburg State University, St. Petersburg 199034, Russia *E-mail: irina.melnikova@pobox.spbu.ru* <sup>2</sup> Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg 195196, Russia *E-mail: kuznetsov1946@inbox.ru* 

The lidar system of St. Petersburg State University, located in the center of St. Petersburg on Vasilievsky Island, is described. Objectives and main tasks of lidar monitoring in city center and results of measurements accomplished on March 5, 2015, are presented. Vertical profiles of the extinction coefficient of atmospheric aerosols in the UV spectral channel (355 nm) and in the visible channel (532 nm) are demonstrated resulting from observations during 3 hours in the day and night time. In addition, vertical profiles of particle concentration, mean particle radius, the imaginary and the real parts of the refractive index are obtained. All these parameters help to draw conclusions on the nature of aerosol particles in the near-surface atmospheric layer above the city characterizing the vertical structure and dynamics of contaminants transformation in St. Petersburg. The results of lidar sounding in the center of the city and the vertical profiles of variations of solid impurity particles parameters are compared in day and night time in the pollution cap above the city. To better understand the formation of the urban pollution cap, we present vertical profiles of meteorological parameters from radiosonde measurements performed in Voeikovo (25 km from the lidar sounding site) twice a day. The analysis of the impact profiles of wind, temperature and humidity in the atmosphere have on the properties and dynamics of solid impurities is accomplished. Direction and speed of contaminants transport over Vasilievsky Island of St. Petersburg at different heights are identified. It is shown that meteorological parameters and time of day affect the dynamics of the pollution cap variation above the city.

Key words: ecological safety, ecological monitoring of the atmosphere, lidar sounding, laser system, meteorological parameters, atmospheric pollution, impact on population health

#### References

- Boreisho A.S., Konyaev M.A., Morozov A.V., Pikulik A.V., Savin A.V., Trilis A.V., Chakchir S.Ya., Boiko N.I., 1. Vlasov Yu.N., Nikitaev S.P., Rozhnov A.V., Mobil'nye mnogovolnovye lidarnye kompleksy (Mobile multiwavelength lidar systems), Kvantovaya Elektronika, 2005, Vol. 12, No. 35, pp. 1167–1178.
- Volkov N.N., Mnogovolnovaya lidarnaya sistema dlya opredeleniya fizicheskikh parametrov troposfernogo aero-zolya: metodika rascheta parametrov i analiza dannykh, Diss. Kand. tekh. nauk (Multi-wave lidar system for 2 obtaining physical parameters of tropospheric aerosols: approach for parameters calculation and data analysis), Cand. Tech. Sci. Thesis, Moscow: MIIGAiK, 2013, 135 p.
- 3. Ginzburg A.S., Mel'nikova I.N., Samulenkov D.A., Sapunov M.V., Katkovskii L.V., Prostaya opticheskaya model' bezoblachnoi i oblachnoi atmosfery dlya rascheta potokov solnechnoi radiatsii (Simple optical model of clear and cloudy atmosphere for calculation of solar irradiance), Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniva Zemli iz kosmosa (in print).
- Donchenko V.K., Melnikova I.N., Boreisho A.S., Morozov A.V., Ispol'zovanie mobil'nykh lidarnykh kompleksov dlya obratnoi zadachi ekologicheskogo monitoring (Using mobile lidar systems for the inverse problem of the ecological monitoring), In: *Ekologiya i kosmos* (Ecology and Space), St. Petersburg, 2010, pp. 101–110. 5. Donchenko V.K., Samulenkov D.A., Melnikova I.N., Boreisho A.S., Chugreev A.V., Lazernye sistemy Resursno-
- go tsentra SPbGU. Vozmozhnosti, postanovka zadach i pervye rezul'taty (Laser systems of Resource centre. St. Petersburg State University. Opportunities, problems setting and first results), *Sovremennye problemy distantsion-nogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 3, pp. 122–132. Ivlev L.S., Vasil'ev A.V., Belan B.D., Panchenko M.V., Terpugova S.A., Optiko-mikrofizicheskie modeli gorodskogo aerozolya (The microphysical model of urban aerosols), *3 konf. Estestvennye i antropogennye*
- 6

aerozoli (3d Conf. Natural and Anthropogenic Aerosols), St.Petersburg, 24-27.09.2001, Proc. Conf., NII Khimii SPbGU, 2003, pp. 161-170.

- Krekov G.M., Rakhimov R.F., Optiko-lokatsionnaya model' kontinental' nogo aerozolya (Optical-radar model of 7. the continental aerosol), Novosibirsk: Nauka SO, 1982, 200 p.
- 8. Mikhailov E.F., Vlasenko S.S. Struktura i opticheskie svoistva sazhevykh aerozolei vo vlazhnoi atmosfere: 2. Vliyanie gidrofil'nosti chastits na koeffitsienty oslableniya, rasseyaniya i pogloshcheniya (Structure and optical properties of soot aerosols in a moist atmosphere: 2. The influence of the hydrophilicity of the particles on the extinction coefficients, scattering and absorption), Izvestiya RAN, Fizika atmosfery i okeana, 2007, Vol. 43, No. 2, pp. 221-233.
- 9 Sapunov M.V., Mel'nikova I.N., Donchenko V.K., Samulenkov D.A., Kuznetsov A.D., Sopostavlenie vertikal'nykh profilei skorosti i napravleniva vetra, poluchennykh na osnove lidarnykh i aerologicheskikh izmerenii (The correlation between lidar and upper-air measurements of vertical profile of wind speed and direction), Sovre-
- (The contration between haar and apper an inevaluence of volteau profile of what speed and encertain, server mennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa (in print).
  10. Althausen D., Müller D., Ansmann A., Wandinger U., Hube, H., Clauder, E., Zoerner, S. Scanning 6-wavelength 11-channel aerosol lidar, *J. Atmospheric and Oceanic Technol.*, 2000, No. 17, pp. 1469–1482.
- 11. Brook Robert D., Shin Hwashin H., Bard Robert L., Burnett Richard T., Vette Alan, Croghan Carry, Thornburg Jonathan, Rodes Charles, Williams Ron, Exploration of the Rapid Effects of Personal Fine Particulate Matter Exposure on Arterial Hemodynamics and Vascular Function during the Same Day, Environmental Health Per*spectives*, Vol. 119, No. 5, 2011, pp. 432–444. 12. Fischer Paul H., Marra Marten, Ameling Caroline B., Gerard Hoek, Beelen Rob, de Hoogh Kees, Breugelmans
- Oscar, Kruize Hanneke, Janssen Nicole A.H., Houthuijs Danny. Environmental Health Perspective Air Pollution and Mortality in Seven Million Adults, The Dutch Environmental Longitudinal Study (DUELS), DOI:10.1289/ ehp.1408254.
- 13. Hoffmann Barbara, Weinmayr Gudrun, Hennig Frauke, Fuks Kateryna, Moebus Susanne, Weimar Christian, Dragano Nico, Hermann Dirk M., Kälsch Hagen, Mahabadi Amir A., Erbel Raimund, Jöckel Karl-Heinz, Air Quality, Stroke, and Coronary Events. Results of the Heinz Nixdorf Recall Study From the Ruhr Region, Deutsches Ärzteblatt International, 2015, 112, pp. 95-201.
- 14. Klett, J.D., Lidar inversion with variable backscatter/extinction ratios. Applied Optics, Vol. 24, 1985, pp. 1638–1643.
- 15. Mallone Sandra, Stafoggia Massimo, Faustini Annunziata, Gobbi Gian Paolo, Marconi Achille, Forastiere Francesco, Saharan Dust and Associations between Particulate Matter and Daily Mortality in Rome, Italy, Environ-
- *mental Health Perspectives*, Vol. 119, No. 10, 2011, pp. 875–888. Melnikova I., Donchenko V., Boreisho A., Morozov A., Laser Complexes for the Solution of the inverse Problem of Ecological Monitoring, *Proceedings of the 25th International Laser Radar Conference*, 5–9 July 2010, St. 16 Petersburg, Russia, 2010, pp. 131-133. 17. Sokolik I.N., and Toon O.B. Incorporation of mineralogical composition into models of the radiative properties of
- Bokonk I.A., and Toon O.D. Incorporation of innertalogical composition into inducts of the radiative properties of mineral aerosol from UV to IR wavelengths, *J. Geophys. Res.* 1999. Vol.104. P. 9423–9444.
   Sugimoto Nobuo, Nishizawa Tomoaki, Shimizu Atsushi, Matsui Ichiro, Jin Yoshitaka, Current status of the Asian Dust and aerosol lidar observation network (AD-NET), *ACTRIS WP2-WP20 workshop*, Oct. 28–31, Content of the Asian Dust and State Content of the Asian Dust a 2014, Lille, France.
- Tzanis C., Varotsos C., Christodoulakis J., Tidblad J., Ferm M., Ionescu A., Lefevre R.-A., Theodorakopoulou 19 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.
- 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, pp. 1543–1557.