

# Лазерные системы Ресурсного Центра СПбГУ. Возможности, постановка задач и первые результаты.

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

Борейшо А.С.<sup>2</sup>, Чугреев А.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб., д. 7/9, 199034, Санкт-Петербург

<sup>2</sup>ООО «НПП «Лазерные системы», 1-я Красноармейская ул., д.1, 190005, г. Санкт-Петербург

The ecological situation and atmospheric pollution become more sensitive in contemporary conditions. Hence the opportune elucidation of danger tendencies of pollution processes and identification of natural, technogenic and biogenic pollutants together with early prevention of ecological danger for environment and population in real time is an important problem of the atmosphere monitoring. Solving pointed problems in regional scale supposes creating a network of ecological safety stations. Local ecological safety observatories are the base for the network. The first observatory is open in St. Petersburg state university, the faculty of geography and geoecology in ranges of the resource center. The ground monitoring atmospheric pollution is accomplished with using lidar multiwave sounding of the atmosphere

**Key words:** ecological safety, ecological monitoring of the atmosphere, lidar sounding, laser complex

В условиях обострения экологической обстановки и загрязнений атмосферы своевременное выявление опасных тенденций процессов загрязнения и идентификация загрязняющих веществ естественного, техногенного и биогенного происхождения и раннее предупреждение об угрозах окружающей среде и населению в реальном времени представляется важной задачей мониторинга атмосферы. Решение указанных задач в региональных масштабах предполагает построение опорной сети станций экологической безопасности, основу которой составляют территориальные обсерватории экологической безопасности. Первая такая обсерватория создана в рамках Ресурсного центра факультете географии и геоэкологии Санкт-Петербургского государственного университета. Наземный контроль состояния загрязнения атмосферы и подстилающей поверхности производится на базе данных лидарного зондирования атмосферы с помощью многоспектральных лазерных комплексов.

**Ключевые слова:** экологическая безопасность, экологический мониторинг атмосферы, лидарное зондирование, лазерный комплекс

## Введение

Глобальные экологические проблемы, связанные с изменением климата, потерей биологического разнообразия, опустыниванием и другими негативными для окружающей среды процессами, возрастанием экологического ущерба от стихийных бедствий и техногенных катастроф, загрязнением атмосферного воздуха, поверхностных и подземных вод, а также морской среды, затрагивают интересы Российской Федерации и её граждан (Постановление, 2012). Экологическая ситуация в Российской Федерации характеризуется высоким уровнем антропогенного воздействия на природную среду и значительными экологическими последствиями прошлой экономической деятельности. В 40 субъектах Российской Федерации более 54 процентов городского населения находится под воздействием высокого и очень высокого загрязнения атмосферного воздуха. Практически во всех регионах сохраняется тенденция к ухудшению состояния почв и земель. Как подчеркива-

ется в (Донченко, 2007), быстрыми темпами наращивается нагрузка на густонаселенные территории Северо-Запада с вкраплениями естественных экосистем, особенно чувствительных к антропогенному воздействию. Своевременное выявление опасных тенденций процессов загрязнения и идентификация загрязняющих веществ естественного, техногенного происхождения и раннее предупреждение об угрозах экологической безопасности в реальном времени относится к предметной области экологической безопасности.

В монографиях (Крапивин, Кондратьев, 2002; Кондратьев, Донченко, 1999) отмечается, что геоэкологические исследования оказываются недостаточно эффективными для оперативной диагностики уровней (оценок риска) загрязнений атмосферы и своевременного предупреждения об угрозе экологической безопасности населения и экосистем. Необходимо оперативное выявление опасных тенденций процессов загрязнения и идентификация загрязняющих веществ. При этом проблема трансграничного переноса экотоксикантов выдвигает на первый план мониторинг и регистрацию состояния атмосферного воздуха (Постановление, 2012) и распространение информации об угрозах экологической безопасности в режиме реального времени. Применение методов дистанционного зондирования атмосферы и, в первую очередь, технологий, основанных на оптико-электронных и лазерно-локационных методах диагностики газовой-аэрозольного состава окружающей среды, открывает новые перспективы в развитии средств и методов контроля экологической безопасности среды и выявления потенциально опасных явлений и объектов.

Решение указанных задач в региональных масштабах требует в будущем построение опорной сети станций экологической безопасности (Донченко, 2007), основу которой составят территориальные обсерватории экологической безопасности по образцу Ресурсного Центра (РЦ) СПбГУ. Первоначальное построение и отработка методик экологического мониторинга для применения на сети станций, а также регистрация трансграничного переноса экотоксикантов в атмосфере уже производится в обсерватории экологической безопасности РЦ СПбГУ. Ресурсный центр оборудован специальной аппаратурой, работающей в реальном времени и позволяющей мгновенный обмен информацией с пользователями. Основными задачами обсерватории экологической безопасности РЦ СПбГУ являются:

1. Формирование моделей влияния на окружающую среду потенциально опасных производств и крупномасштабных строительных работ;
2. Оценка трансграничного переноса загрязнений воздушным путем;
3. Формирование моделей прогнозов развития неблагоприятной ситуации в окружающей среде и методики оценки вероятного экономического ущерба;
4. Подготовка ситуационных синтезированных карт подозреваемых зон и объектов возникновения угроз экологической безопасности;

5. Подготовка оперативных ситуационных синтезированных карт с оценкой состояния экологической безопасности зон и объектов повышенного экологического риска.

Перспективным направлением в области экологического мониторинга является применение в обсерваториях экологической безопасности многоспектрального лазерного комплекса, позволяющего мгновенно регистрировать наличие в атмосфере малых концентраций загрязняющих газовых и аэрозольных веществ. Для загрязненных территорий важным является определение предельно-допустимых экологических нагрузок (ПДН) поступления загрязняющих веществ в атмосферу. Таким образом, на первый план выходит наземный контроль состояния загрязнения атмосферы на основе данных лидарного зондирования атмосферы с помощью многоспектральных лазерных комплексов (МЛК). Важной задачей РЦ СПбГУ является также разработка учебных программ, включающих лекционные курсы и лабораторный практикум для обучения студентов работе с современным оборудованием дистанционного зондирования.

### **Определение коэффициентов рассеяния аэрозоля из данных лидарного зондирования**

Стационарный и мобильный многоволновые лидарные комплексы (Boreysho et al., ) дают информацию о концентрации и физической природе атмосферного аэрозоля, химическом составе газовой фазы атмосферы, ветре и турбулентности на расстоянии до 25 км на вертикальной и наклонных трассах в любых направлениях. Лидарный комплекс позволяет осуществлять лидарное зондирование в широком спектральном диапазоне длин волн.

Лазерные импульсы длительностью порядка 10 наносекунд, 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). Развертка сигналов во времени обеспечивает получение информации о точках в пространстве на луче распространения лидарного импульса. Характерные времена лидарного зондирования сопоставимы с временами изменчивости самой атмосферы, поэтому лидары позволяют синхронно получать данные об аэрозоле и о газовой фазе.

Далее решается обратная задача лидарного зондирования – восстановление концентраций определяемых веществ (Донченко и др. 2010). Для этого были разработаны специальные алгоритмы решения всего набора обратных задач, которые отличаются методами и

подходами к регуляризации решений для разных исследуемых компонентов (Veselovskii et al., 2009). 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, т. е., фактически, осуществляется первый этап обратной задачи экологической безопасности.

Для восстановления оптических параметров атмосферы используется основное уравнение лидарного зондирования, которое обычно записывается в виде:

$$P(z) = A \frac{\beta(z)}{z^2} \exp\left[-2 \int_0^z \alpha(z') dz'\right] \quad (1)$$

где  $P(z)$  – мощность рассеянного сигнала с дистанции  $z$ ,  $A$  – аппаратная константа, включающая мощность лазера, апертуру приемного телескопа и эффективность системы регистрации,  $\beta(z)$  и  $\alpha(z)$  – коэффициенты обратного рассеяния и экстинкции, которые зависят от свойств рассеивающих частиц и являются искомыми в нашей задаче. Уравнение содержит два неизвестных, и не может быть решено без введения функциональной зависимости между  $\alpha$  и  $\beta$ .

#### *Метод Клетта*

Одним из наиболее распространенных методов решения лидарного уравнения является метод Клетта (Klett, 1981). Упомянутая неопределенность устраняется в этом методе в предположении постоянства лидарного отношения  $\beta(z) / \alpha^k(z) = R$ , где  $k$  – параметр, зависящий от типа аэрозоля. В этом случае лидарное уравнение, после дифференцирования обеих частей, может быть записано в виде:

$$\frac{dS}{dz} = \frac{k}{\alpha(z)} \frac{d\alpha(z)}{dz} - 2\alpha(z) \quad (2)$$

Это уравнение известно, как уравнение Рикатти. Его решение имеет вид:

$$\alpha(z) = \frac{\exp[(S - S_{ref})/k]}{\alpha_{ref}^{-1} + \frac{2}{k} \int_z^{z_{ref}} \exp[(S - S_{ref})/k] dz'} \quad (3)$$

где граничное условие задается в некой удаленной точке  $z_{ref}$ :  $S_{ref} = S(z_{ref})$  и  $\alpha_{ref} = \alpha(z_{ref})$ .

Для двухкомпонентной атмосферы рассеяние обусловлено молекулярным и аэрозольным вкладами:  $\alpha(z) = \alpha^m(z) + \alpha^a(z)$  и  $\beta(z) = \beta^m(z) + \beta^a(z)$ .

Полный коэффициент обратного рассеяния записывается в виде суммы для этих компонентов:  $\beta(z) = \frac{1}{R^m} \alpha^m(z) + \frac{1}{R^a} \alpha^a(z)$ , где  $R^m = 8\pi/3$  – лидарное отношение для молекулярного рассеяния, а  $R^a$  – лидарное отношение для аэрозоля. Уравнение (2) переписывается в виде:

$$\frac{dS}{dz} = \frac{1}{\beta(z)} \frac{d\beta(z)}{dz} - 2[R^a \beta^a(z) + R^m \beta^m(z)] = \frac{1}{\beta(z)} \frac{d\beta(z)}{dz} - 2R^a \beta(z) + 2(R^a - R^m) \beta^m(z) \quad (4)$$

решение уравнения может быть получено в виде:

$$\beta^a(z) = \frac{\exp[(S'-S'_{ref})]}{\beta_{ref}^{-1} + 2 \int_z^{z_{ref}} R^a \exp[(S'-S'_{ref})] dz'} \quad (5)$$

Для задания граничного условия предполагается, что на некоторой высоте рассеяние обусловлено только молекулами  $\beta_{max} \approx \beta^m_{max}$  и, следовательно, может быть вычислено следующим образом:  $\beta^m(z) = N^m(z) 5,54 \times \left[\frac{550}{\lambda}\right]^4 \times 10^{-28}$  [см<sup>-1</sup>ср<sup>-1</sup>]. Здесь  $N^m$  концентрация молекул воздуха. Коэффициент  $k$  обычно полагают равным единице. В тех случаях, когда не удается достичь области атмосферы свободной от аэрозоля (на трассах, близких к горизонтальным), использование метода Клетта в явном виде оказывается невозможным.

### Рамановский метод

Лидарное уравнение может также быть решено при использовании Рамановского рассеяния одной из составляющих атмосферы с известным распределением плотности (Ansmann et al., 1992). В качестве такой молекулярной составляющей обычно выбирается азот, поскольку его Рамановский сигнал максимален. В этом случае мы имеем два лидарных уравнения для упругого и неупругого рассеяния на длинах волн  $\lambda$  и  $\lambda_R$  соответственно.

$$P_\lambda(z) = A \frac{\beta_\lambda^a(z) + \beta_\lambda^m(z)}{z^2} \exp\left[-2 \int_0^z (\alpha_\lambda^a(z') + \alpha_\lambda^m(z')) dz'\right] \quad (6)$$

$$P_{\lambda_R}(z) = A_{\lambda_R} N_R(z) \frac{\sigma_{\pi, \lambda_R}}{z^2} \exp\left[-\int_0^z (\alpha_\lambda^a(z') + \alpha_\lambda^m(z') + \alpha_{\lambda_R}^a(z') + \alpha_{\lambda_R}^m(z')) dz'\right]$$

Здесь  $P_\lambda(z)$ ,  $P_{\lambda_R}(z)$  – мощность рассеянного излучения на длинах волн  $\lambda$  и  $\lambda_R$ ;  $A_\lambda$  и  $A_{\lambda_R}$  – аппаратные константы;  $\beta_\lambda^a(z)$  и  $\beta_\lambda^m(z)$  – коэффициенты обратного аэрозольного и молекулярного рассеяния;  $\alpha_\lambda^a(z)$ ,  $\alpha_\lambda^m(z)$ ,  $\alpha_{\lambda_R}^a(z)$ ,  $\alpha_{\lambda_R}^m(z)$  – коэффициенты экстинкции на исходной и смещенной длине волны;  $\sigma_{\pi, \lambda_R}$  – дифференциальное сечение комбинационного рассеяния и  $N_R(z)$  – концентрация молекул, на которых происходит комбинационное рассеяние. Тогда коэффициент экстинкции аэрозоля может быть вычислен из выражения:

$$\alpha_\lambda^a(z) = \frac{\frac{d}{dz} \ln\left(\frac{N_R(z)}{P_{\lambda_R}(z) z^2}\right) - \alpha_\lambda^m(z) - \alpha_{\lambda_R}^m(z)}{1 + \left(\frac{\lambda}{\lambda_R}\right)^\delta}, \quad (7)$$

где неизвестным параметром является коэффициент Ангстрема  $\delta$ , определяющий спектральную зависимость коэффициента экстинкции аэрозоля, здесь выбирается  $\delta=1$ . Следует отметить, что даже двукратная ошибка в определении коэффициента Ангстрема, приводит к погрешности в определении  $\alpha^a(z)$  всего лишь на уровне нескольких процентов, потому что  $\lambda$  и  $\lambda_R$  мало отличаются друг от друга. Коэффициент обратного рассеяния может быть вычислен из отношения упругого и Рамановского сигналов

$$\beta_{\lambda}^a(z) = -\beta_{\lambda}^m(z) + [\beta_{\lambda}^a(z_{ref}) + \beta_{\lambda}^m(z_{ref})] \times \frac{P_{\lambda R}(z_{ref})P_{\lambda}(z)N_R(z)}{P_{\lambda}(z_{ref})P_{\lambda R}(z)N_R(z_{ref})} \times \frac{\exp\left[-\int_{z_{ref}}^z (\alpha_{\lambda R}^a(z') + \alpha_{\lambda R}^m(z'))dz'\right]}{\exp\left[-\int_{z_{ref}}^z (\alpha_{\lambda}^a(z') + \alpha_{\lambda}^m(z'))dz'\right]}, \quad (8)$$

В точке привязки  $\beta_{\lambda}^m(z_{ref}) \gg \beta_{\lambda}^a(z_{ref})$ . Данное условие, обычно, с хорошей точностью выполняется в верхней тропосфере.

#### Вычисление обратного рассеяния на длине волны 1064 нм

Рамановский сигнал рассеяния при использовании длины волны 1064 нм очень слабый и не может быть использован в расчетах. Обратное рассеяние на 1064 нм может быть вычислено по Клетту или непосредственно из лидарного уравнения (Veselovskii, 2009).

$$P_{\lambda}(z) = A \frac{\beta_{\lambda}^a(z) + \beta_{\lambda}^m(z)}{z^2} \exp\left[-2 \int_0^z (\alpha_{\lambda}^a(z') + \alpha_{\lambda}^m(z'))dz'\right] \quad (9)$$

$$P_{\lambda}(z_{ref}) = A \frac{\beta_{\lambda}^m(z_{ref})}{z_{ref}^2} \exp\left[-2 \int_0^{z_{ref}} (\alpha_{\lambda}^a(z') + \alpha_{\lambda}^m(z'))dz'\right] \quad (10)$$

Из выражений (9) и (10) можно получить окончательный результат для аэрозольного коэффициента обратного рассеяния

$$\beta_{\lambda}^a(z) = \beta_{\lambda}^m(z_{ref}) \frac{P_{\lambda}(z)}{P_{\lambda}(z_{ref})} \exp\left[2 \int_0^z (\alpha_{\lambda}^a(z') + \alpha_{\lambda}^m(z'))dz'\right] - \beta_{\lambda}^m(z)$$

Коэффициент аэрозольной экстинкции на длине волны 1064 нм  $\alpha_{1064}^a(z)$  берется из рамановских измерений на 532 нм и пересчитывается с использованием коэффициента Ангстрема.

#### Описание лидарного комплекса

Составляющие элементы лидарного комплекса: *Стационарный лидарный комплекс* обеспечивает сбор информации из нижнего приземного слоя атмосферы (до высоты 3 км) и из тропосферы (до высоты 25 км). Детектируемые параметры атмосферного аэрозоля: средний и эффективный радиусы частиц; числовая, поверхностная и объемная концентрации частиц; комплексный показатель преломления вещества частиц; содержание водяного пара; коэффициент деполяризации; коэффициенты обратного рассеяния и экстинкции аэрозоля; размер детектируемых аэрозолей в диапазоне от 0,5 до 11 мкм; Детектируемые параметры атмосферы: скорость ветра; направление ветра; уровень турбулентности; «сдвиг» ветра.

Комплекс позволяет: 1) определять местоположение и отслеживать эволюцию естественных и искусственных аэрозольных образований в атмосфере; 2) исследовать фи-

зическую структуру аэрозоля и оценивать интегральный размер частиц аэрозоля; 3) дистанционно определять скорость и направление ветра на различных высотах; 4) вести картографирование местности с нанесением на цифровую карту местности концентраций аэрозолей и химических примесей в атмосфере; 5) формировать прогноз распространения примесей в атмосфере по результатам измерений концентраций примесей и по измеренной актуальной ветровой обстановке; 6) оперативно выявлять источники загрязнения атмосферы; 7) формировать заданную форму отчетов по результатам измерений; 8) хранить и управлять базами данных проведенных ранее измерений.

Многоволновый лидарный комплекс функционирует в диапазоне температуры окружающей среды от минус 20 до плюс 50°C и в диапазоне давлений от 670 до 800 мм рт. столба. Для поддержания необходимых условий эксплуатации мобильный многоволновый лидар оснащен климатической установкой, обеспечивающей заданный температурный режим внутреннего пространства в диапазоне от плюс 15 до плюс 28°C с шагом 1°C. Комплектация оборудования включает все необходимые принадлежности для его нормального функционирования (включая источники питания и понижающие трансформаторы, компьютерное программное и аппаратное обеспечение). В состав **стационарного многоволнового комплекса** включены следующие устройства:

- *Доплеровский гетеродинный лидар (ДГЛ)* для измерения скорости и направления ветра в составе: стабилизированный полупроводниковый лазерный излучатель; одночастотный волоконный лазерный усилитель; узел установки и юстировки передающего оптического тракта; узел установки и юстировки приемного оптического тракта; блок термостабилизации приемо-передающего оптического тракта; блок питания и управления параметрами излучателя, диапазон скорости ветра от 0,5 до 40 м/сек, погрешность измерения скорости ветра менее 0,5 м/сек, диапазон измерения направления ветра – от 0° до 360° с погрешностью не более 5°.
- *Аэрозольный лидар (АЛ)* в составе: перестраиваемый стабилизированный Nd:YAG лазерный излучатель (355, 532, 1064 нм); узел установки и юстировки лазера; модуль приемного канала; модуль оптического формирующего тракта; модуль оптического приемного тракта; блок питания и управления параметрами излучателя;
- *Телескоп приемо-передающий* обеспечивает формирование лазерного излучения всех лидаров из состава мобильного многоволнового лидара, передачу этого излучения через сканирующую систему на исследуемые объекты, прием полезных сигналов, содержащих информацию о веществе объектов, о его концентрации и о дальности до объекта. Световой диаметр телескопа 350 мм, отражающие поверхности зеркал телескопа защищены специальным покрытием.

- *Сканирующая система* обеспечивает прецизионное угловое позиционирование визирной линии в диапазоне сканирования по азимуту от 0° до 360° и по углу визирования от 0° до 110° с минимальным шагом 1 угл. мин и максимальной скоростью 20°/сек. Кроме того в состав оборудования входят *система видеонаблюдения, виброизолирующее основание* лидарного оборудования с системой развязки от вибраций носителя, *система жизнеобеспечения* и *вспомогательное оборудование* (юстировочный комплект, включая набор визуализаторов, юстировочных He-Ne лазеров). *Система управления и сбора данных* включает системы управления, обработки сигнала гетеродинного канала (доплеровский лидар), синхронизации взаимодействия основных подсистем мобильного лидара, связи и передачи данных для автоматизированного управления параметрами излучателей лидаров и параметрами видеокамеры и сканирующей системой, автоматизированного сбора данных от приемных элементов лидаров, автоматического поддержания заданных параметров и контроля работоспособности оборудования лидара с выводом информации о неисправности. *Программное обеспечение многоволнового лидарного комплекса*, включает *общее программное обеспечение* с операционной системой и *общесистемное программное обеспечение*, объединяющее систему управления базами данных мобильного лидара для приема, хранения и передачи первичных данных лидарных измерений в другие подсистемы лидарного комплекса (включая программное обеспечение ситуационно-информационного центра) и геоинформационную систему для работы с цифровыми картами местности.

**Мобильный многоволновый лидар** является транспортируемым модулем на носителе (платформе масштаба микроавтобуса), в котором размещается оборудование лидарной системы и кабина управления, и позволяет проводить экологический мониторинг в различных географических точках. Мобильный лидар является полностью автономной и высоко автоматизированной системой, имеющей собственное энергоснабжение и климатическую установку. *Мобильный лидарный комплекс* включает мобильный носитель с грузовым отсеком, несущим лидарные подсистемы, систему энергообеспечения с дизель-генератором. В мобильном комплексе дополнительно установлен *коротковолновый лидар дифференциального поглощения (КВ-ДП)* объединяющий: модуль перестраиваемого многоволнового Ti:Sph лазера (700...960, 350...480, 230...310 нм). Дополнительный лидар позволяет кроме перечисленных функций стационарной системы дистанционно детектировать концентрацию малых газов в атмосфере (SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, Cl<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>), линии поглощения которых совпадают с диапазоном излучения лазера.

**Ситуационно-информационный центр** сбора, анализа и хранения данных



лидарных измерений предназначен для дополнительной обработки информации, получаемой с лидарных комплексов, оснащен мощными компьютерами и пакетами программ, для построения карт распространения загрязнений и потенциальных рисков экологической опасности и прогнозов экологической ситуации в исследуемом регионе с анализом, обобщением и прогнозированием состояния атмосферы по данным лидарных измерений. **Ситуационный центр** осуществляет ассимиляцию полученных данных о направлении и скорости распространения экотоксикантов, оценивает риски наступления экологически опасной ситуации, строит прогнозы развития загрязнения окружающей среды и формирует рекомендации для лиц, принимающих решения, обеспечивая возможность быстрого реагирования для устранения опасности или эвакуации населения. Решение задачи оценки рисков позволит отслеживать объективные числовые значения, характеризующие состояние окружающей среды, в частности и состояние среды большого города. Такую задачу следует назвать **обратной задачей экологического мониторинга** (Донченко и др., 2010), которая включает в себя следующие этапы: Обработка данных наземного оптического зондирования; Решение обратной задачи оптики лазеров. (результат – оптические параметры атмосферы – коэффициенты поглощения и рассеяния и индикатриса рассеяния); Решение обратной задачи микрофизики аэрозолей (концентрации примесей в атмосфере, размер аэрозольных частиц, направление и скорость их переноса в атмосфере); 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 направлений их распространения в сторону густонаселенных районов); Расчет рисков соответствующих опасных и катастрофических явлений. Оперативное определение значений рисков тех или иных экологически-опасных событий позволяет управление устойчивым развитием региона.

#### *Первые результаты лазерного мониторинга*

Лазерное зондирование относится к классу активных измерений, так как использует сигнал, генерируемый лазером (комплексом лазеров). Лидарный (лидар = лазер+радар) комплекс позволяет в реальном масштабе времени осуществлять экологический мониторинг изучаемых объектов и оперативно получать результат в виде экологической информации – концентрации и направления распространения загрязняющих веществ различной природы в воздухе. Значения концентраций загрязняющих компонентов атмосферы получаемое в результате применений лазерного комплекса в обсерватории экологической безопасности позволяет непосредственно, сравнивая полученные результаты с пороговыми

значениями концентраций определять наступление опасных ситуаций для экосистем и населения (Melnikova et al., 2010).

На рисунках 1 и 2 представлен пример вертикального профиля объемного коэффициента ослабления (экстинкции)  $\alpha(z)$ , полученный из зондирования в направлении в зенит в канале 1064 нм, выполненного 25 марта 2013 г. на башне обсерватории экологической безопасности СПбГУ, расположенной в центре Санкт-Петербурга на Васильевском острове.

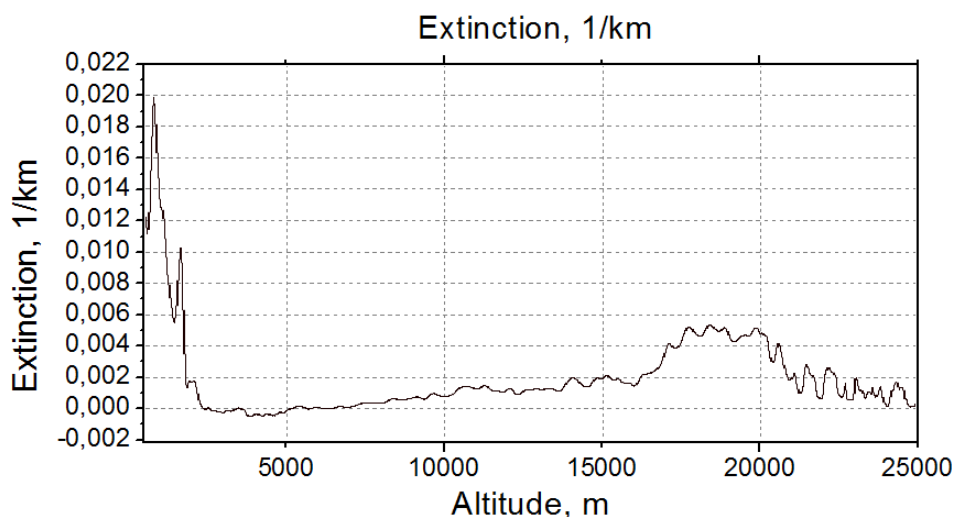


Рис. 1. Зависимость объемного коэффициента ослабления в безоблачной атмосфере, усредненного за 1 час, по результатам обработки сигнала обратного рассеяния, зарегистрированного в лидарном зондировании 25.03.2013 в центре Санкт-Петербурга.

На рисунке 1 показан график коэффициента экстинкции, усредненного за 1 час наблюдений, развертка вертикального профиля во времени в тропосфере до 4 км дана на рис. 2а и до 25 км на рис. 2б.

На рисунках четко прослеживается шапка загрязнений над городом до высоты 1,7 км в виде двух максимумов: на 0,7 км, который рассасывается в течение 45 мин (от 15:30 до 16:15) ( $\alpha(z) \sim 0,056 \text{ км}^{-1}$ ) и более устойчивый слой, но меньшей интенсивности на высоте 1,5 км ( $\alpha(z) \sim 0,022 \text{ км}^{-1}$ ). В стратосфере отчетливо виден слой аэрозолей или тонкой перистой облачности на высотах от 17 до 22 км ( $\alpha(z) \sim 0,02 \text{ км}^{-1}$ ). Слабые вертикальные вариации коэффициента ослабления ( $\alpha(z) \sim 0,007 \text{ км}^{-1}$ ) устойчиво прослеживаются по всей толщине от 0 до 25 км, указывают на слабые аэрозольные слои в атмосфере.

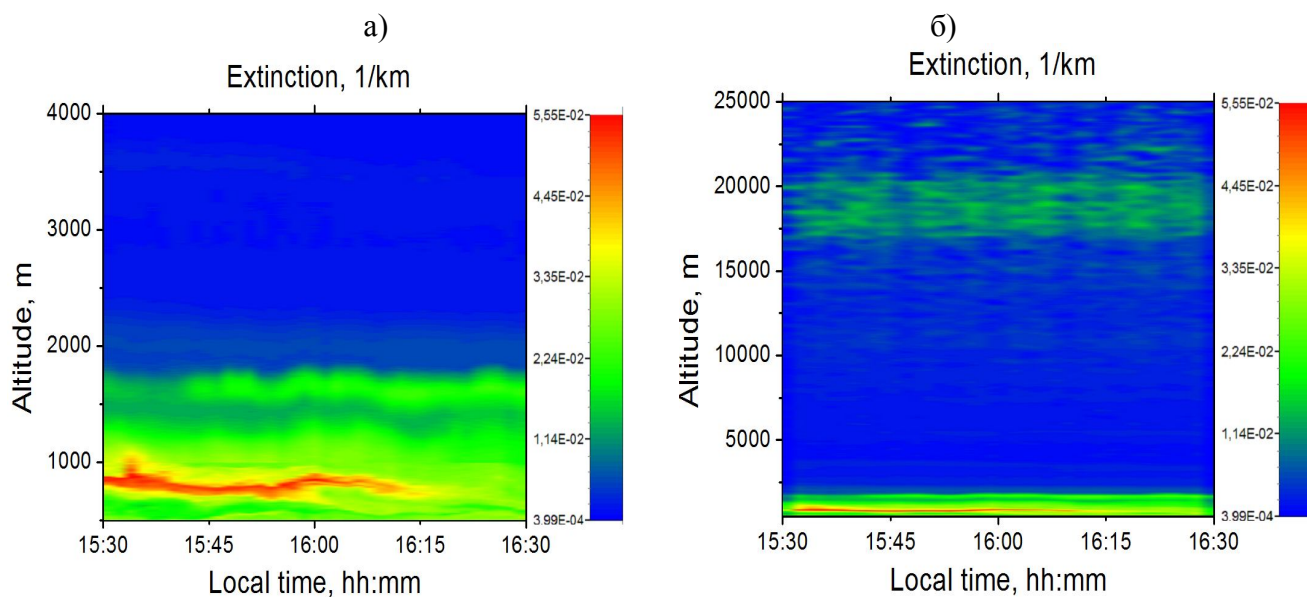


Рис. 2. Временная зависимость изменчивости вертикального профиля объемного коэффициента ослабления в слое атмосферы а) 0–4 км и б) 0–25 км по результатам обработки сигнала обратного рассеяния, зарегистрированного в лидарном зондировании 25.03.2013 в центре Санкт-Петербурга. Шкала справа показывает значение коэффициента ослабления в  $\text{км}^{-1}$

### Заключение

Охрана окружающей среды не может осуществляться в отдельном регионе, а требует анализа мер в глобальном масштабе, в том числе и сотрудничества между государствами. Как предписано в (Постановление, 2012), «для развития международного сотрудничества в области охраны окружающей среды необходима «реализация мер по активизации сотрудничества с иностранными государствами и международными организациями в природоохранной сфере, направленных на более эффективное отстаивание и защиту интересов РФ в международных договорах природоохранной направленности, а также парирование угроз, связанных с трансграничным загрязнением». Анализ возможностей лидарного комплекса демонстрирует его богатые возможности для экологического мониторинга состояния окружающей среды в обсерватории экологической безопасности и для индикации трансграничного переноса загрязнений. Комплекс оснащен современными компьютерными технологиями для управления комплексом, обработки результатов и их представления в форме экологической информации, удобной для лиц, принимающих решения. Результирующие характеристики можно представлять величинами рисков повышенных загрязнений атмосферы и оценивать их влияние на здоровье населения. Ситуационный центр обеспечивает оперативную обработку данных мониторинга и позволяет построение прогнозов развития экологической ситуации. Оптические активные методы дистанционного зондирования с поверхности земли, способны обеспечить определение не только оптических параметров атмосферы и атмосферных аэрозолей, но и экологических парамет-

ров – значений экологических рисков тех или иных экологически опасных событий, связанных с состоянием атмосферы в локальных масштабах. «Развитие международного информационного обмена и участие в международных проектах по приоритетным направлениям развития науки, техники и технологий в области охраны окружающей среды и обеспечения экологической безопасности, защиты природной среды» (Постановление, 2012) требует вступления РЦ СПбГУ в Европейскую лидарную сеть для эффективного обмена данными, алгоритмами и методами обработки данных, что и выполняется в настоящее время.

### Литература

Донченко В.К. // Актуальные проблемы изучения техногенного загрязнения окружающей среды. Экологическая безопасность. Методологические проблемы экологической безопасности № 1-2 Санкт-Петербург: НИЦЭБ РАН, 2007. С. 17-18.

Донченко В.К., Мельникова И.Н., Борейшо А.С., Морозов А.В. Использование мобильных лидарных комплексов для обратной задачи экологического мониторинга // Сборник «Экология и космос», Санкт-Петербург - Петродворец, 2010. С. 101-110.

Крапивин В.Ф., Кондратьев К.Я. // Глобальные изменения окружающей среды. Экоинформатика. Санкт-Петербург: 2002. 724 с.

Кондратьев К.Я., Донченко В.К. // Экодинамика и геополитика. Санкт-Петербург, 1999. Т. 1. 1032 с.

Постановление Правительства РФ // «Основы государственной политики в области экологического развития Российской Федерации на период до 2030 года» (утв. Президентом РФ 30.04.2012).

Ansmann A., Riebesell M., Wandinger U., Weitkamp C., Voss E., Lahmann W., Michaelis W. Combined Raman elastic-backscatter, and lidar ratio. Appl. Phys. B 55, 18, 1992.

Boreysho A.S., Chakchir S.Ya., Konyaev M.A., Kononov K.A., Savin A.V. Optical Heterodyning in Differential Tunable CO<sub>2</sub> Laser Systems. American Institute of Aeronautics and Astronautics Toronto, 2005 Chapter DOI: 10.2514/6.2005-5367

Klett D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns // Appl. Opt. 1981, V. 20. P. 211-220.

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. С. 131-133.

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. V.26. P.1543-1557.