

А.В. Ельников<sup>1</sup>, В.Д. Бурлаков<sup>1</sup>, С.И. Долгий<sup>1</sup>, В.В. Зуев<sup>1</sup>, А.В. Невзоров<sup>1</sup>,  
И.И. Плюснин<sup>2</sup>, С.М. Сысоев<sup>2</sup>, К.И. Бушмелева<sup>2</sup>, М.С. Черный<sup>2</sup>

## Лидарная система для зондирования аэрозоля в г. Сургуте в рамках проекта CIS-LiNet

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск  
<sup>2</sup>Сургутский государственный университет, г. Сургут

Поступила в редакцию 29.05.2006 г.

Дано описание лидарной системы Сургутского государственного университета, являющейся одной из точек сети лидарных станций стран СНГ (CIS-LiNet). Лидар ориентирован на исследования аэрозольной компоненты атмосферы как в тропосфере, так и в стратосфере. Приведена блок-схема лидара, кратко изложена используемая методика определения характеристик обратного рассеяния аэрозоля. Представлены результаты его интеркалибровки с лидаром, работающим в режиме счета фотонов в Томске.

### Введение

Для изучения региональных и крупномасштабных пространственно-временных изменений полей атмосферных параметров в настоящее время в мире широко используются сети лидарных станций, на которых проводятся регулярные координированные измерения методами лазерного зондирования атмосферы. На наиболее широкомасштабной сети обнаружения стратосферных изменений (NDSC) с помощью лидаров осуществляются, в основном, измерения стратосферного озона, аэрозоля и температуры. Европейская аэрозольная лидарная сеть (EARLINET) включает 22 лидарные станции для исследований процессов переноса аэрозольных загрязнений природного и антропогенного происхождения над Европой. Процессы переноса аэрозоля в Азии, происхождение которого обусловлено пылью, изучаются лидарными станциями сети AD-LiNet.

До недавнего времени на огромной территории бывшего Советского Союза координированные измерения отсутствовали. Имелись коллективы и научные школы лазерного зондирования атмосферы, которые работали независимо друг от друга. В конце 2004 г. при поддержке Международного научно-технического центра (МНТЦ) по проекту «Мониторинг атмосферного аэрозоля и озона в регионах СНГ посредством сети лидарных станций (CIS-LiNet)» на территории Евроазиатского континента была организована еще одна лидарная сеть — сеть стран СНГ (CIS-LiNet). Сеть объединила рабочие группы из научных организаций России, Беларуси и Кыргызстана.

Одной из задач вышеназванного проекта МНТЦ является развитие самой сети CIS-LiNet, охват ею как можно большей территории СНГ. Исторически сложилось так, что действующие лидарные станции на территории СНГ расположены в средних широтах. Наиболее северной точкой является г. Томск (56,5° с.ш., 85,0° в.д.). Однако особый интерес с точ-

ки зрения физики атмосферы и климатологии представляют арктические и субарктические широты. Реализация в этих регионах в настоящее время регулярных наблюдений довольно затруднительна ввиду отсутствия квалифицированных научных кадров и технической базы. Поэтому первым шагом в развитии сети CIS-LiNET на север стало создание пункта лидарных наблюдений за состоянием аэрозольной компоненты в г. Сургуте (61,3° с.ш., 73,5° в.д.) на базе Сургутского государственного университета (СурГУ). Описанию разработанного лидара и некоторым результатам, полученным с его помощью, посвящена данная статья.

### 1. Техническое описание лидара

Лидар СурГУ создан по аналогии с лидаром, функционирующим в течение длительного времени в Институте оптики атмосферы СО РАН (ИОА СО РАН), г. Томск [1, 2]. Приеморегистрирующий тракт лидара ИОА СО РАН состоит из двух каналов, формирующихся с помощью светоделителя и работающих в режиме счета фотонов. На канал, ориентированный на стратосферные исследования, приходится 95% собираемого телескопом обратнорассеянного лазерного излучения (светоделитель работает на пропускание). На второй канал отражается 5% от всего излучения из атмосферы (светоделитель работает на отражение). Этот канал предназначен для получения информации о вертикальной стратификации аэрозоля в тропосфере, как можно ближе к земной поверхности.

На лидаре СурГУ работа тропосферного канала осуществляется в токовом (аналоговом) режиме работы ФЭУ, что позволяет проводить более детальные, по сравнению со счетно-фотонным режимом, исследования в тропосфере, практически до приземного слоя. Блок аналоговой регистрации и его программный

интерфейсы были разработаны и изготовлены в Минске, в Институте физики НАН Беларуси.

Блок-схема разработанного лидара СурГУ и, для сравнения, приемной части работающего в Томске лидара представлена на рис. 1. Здесь дана схема их компоновки при проведении интеркалибровочных измерений в Томске, реализованных с использованием одного лазерного передатчика, изображенного в правой части рис. 1, *a*.

Для исследования оптических характеристик атмосферного аэрозоля в сети CIS-LiNet в качестве базовой длины волны используется вторая гармоника Nd:YAG-лазера —  $\lambda = 532$  нм. Данная унификация необходима для проведения интеркалибровочных измерений лидарной аппаратуры, объективного сравнения алгоритмов обработки измерений и самих результатов лазерного зондирования.

В качестве источника зондирующего излучения лидара СурГУ используется Nd:YAG-лазер (модель LS-2135 фирмы LOTIS-TH) с частотой повторения лазерных импульсов 10 Гц и энергией импульса второй гармоники ( $\lambda = 532$  нм) 150 мДж. Это лазер работал и при проведении интеркалибровочных измерений

в Томске. Диаметр основного зеркала приемного телескопа равен 0,3 м (Пр.3 на рис. 1). Расстояние между оптическими осями лидарного передатчика и приемника составляет 40 см. Расходимость выходного лазерного излучения с использованием линзового телескопа (Т) уменьшается до 0,1 мрад. Диаметр полевой диафрагмы (ПД) 1,5 мм. Пропускание интерференционного фильтра (ИФ) равно 60%, ширина пропускания в середине максимума 2 нм. Поворотное зеркало (СвД) пропускает на аналоговый канал 30% всего проходящего излучения и отражает 70% на счетный канал. В качестве фотоприемников излучения используются фотоэлектронные умножители: ФЭУ-130 (режим счета фотонов) и ФЭУ-84 (токовый режим). Для защиты фотоприемника счетно-фотонного канала от перегрузок лидарным сигналом от ближней зоны используется электронное управление коэффициентом усиления ФЭУ, обозначенное на блок-схеме цифрой 1 [2].

В конце апреля 2006 г. разработанный лидар был смонтирован в г. Сургуте и введен в действие. На рис. 2 представлены внешний вид лидара и его размещение в СурГУ.

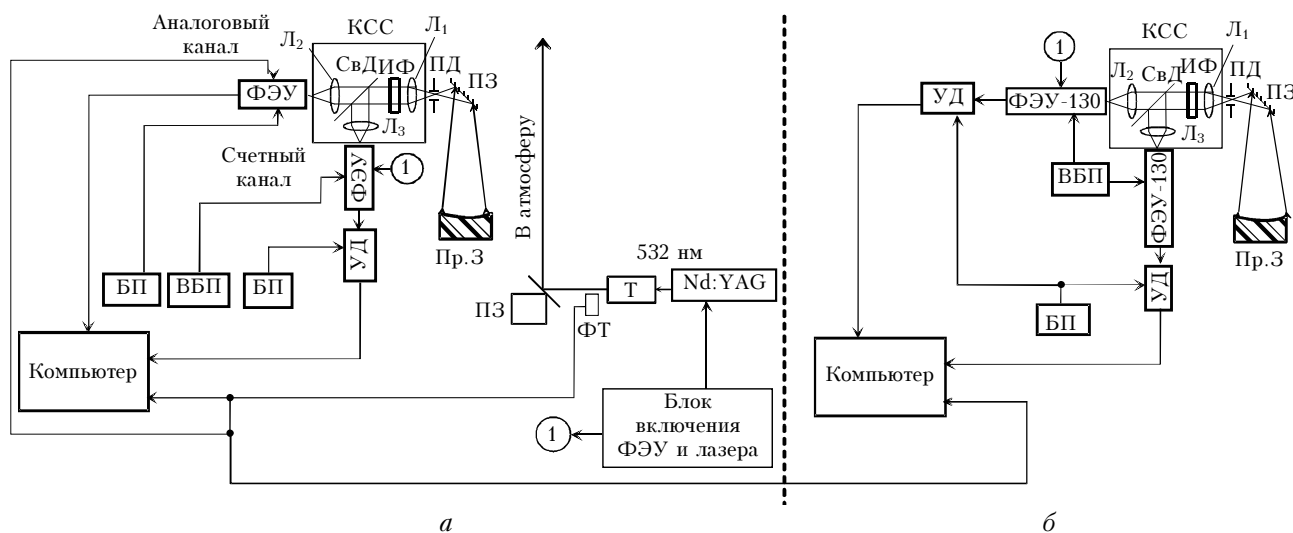


Рис. 1. Блок-схема лидаров для пунктов измерений: *a* — в Сургуте, *б* — в Томске; Nd:YAG-лазер; Т — передающий телескоп; ПЗ — поворотные зеркала; Пр.3 — приемные зеркала диаметром 0,3 м; ПД — полевые диафрагмы; КСС — кюветы спектральной селекции; Л<sub>1</sub> — коллимирующие линзы; ИФ — интерференционные фильтры; СвД — светоделители; Л<sub>2</sub>, Л<sub>3</sub> — фокусирующие линзы; УД — усилители-дискриминаторы; ФТ — запускающий фототранзистор; ВБП — высоковольтные блоки питания; БП — блоки питания



Рис. 2. Общий вид лидарного комплекса и лазерный луч в атмосфере Сургута

## 2. Методика определения оптических характеристик атмосферного аэрозоля

Взаимосвязь между принятым сигналом и оптическими характеристиками атмосферы постулируется лидарным уравнением

$$N(H) = CH^{-2}\beta_{\pi}(H)T_m^2(H)T_a^2(H), \quad (1)$$

где  $H$  — высота;  $N(H)$  — информативный зарегистрированный сигнал (за вычетом фона);  $C$  — аппаратная константа;

$$\beta_{\pi}(H) = \beta_{\pi}^m(H) + \beta_{\pi}^a(H),$$

$\beta_{\pi}^m(H)$ ,  $\beta_{\pi}^a(H)$  — коэффициенты обратного молекулярного и аэрозольного рассеяния соответственно;

$$T_m(H) = \exp\left[-\int_0^H \alpha_m(h) dh\right] \text{ и } T_a(H) = \exp\left[-\int_0^H \alpha_a(h) dh\right]$$

— прозрачность атмосферы, обусловленная соответственно коэффициентами молекулярного ( $\alpha_m(h)$ ) и аэрозольного ( $\alpha_a(h)$ ) ослаблений, представляющими собой сумму коэффициентов поглощения и полного рассеяния. Коэффициенты поглощения значительно меньше коэффициентов полного рассеяния, поэтому  $\alpha_m$  и  $\alpha_a$  представляют собой коэффициенты полного рассеяния на молекулах и аэрозоле соответственно. В уравнении (1) профиль коэффициента обратного молекулярного рассеяния  $\beta_{\pi}^m(H)$  предполагается известным либо из данных аэрологического зондирования, либо на основе модельных значений.

Из уравнения (1) следует, что

$$\beta_{\pi}(H) \equiv \beta_{\pi}^m(H) + \beta_{\pi}^a(H) = \frac{N(H)H^2}{CT_m^2(H)T_a^2(H)}. \quad (2)$$

Таким образом, превышение значений  $\beta_{\pi}(H)$  относительно  $\beta_{\pi}^m(H)$  соответствует значениям коэффициента обратного аэрозольного рассеяния, т.е.  $\beta_{\pi}^a(H) = \beta_{\pi}(H) - \beta_{\pi}^m(H)$ . Для определения аппаратной константы  $C$  в некоторой точке  $H_0$  на трассе зондирования априори задается значение  $\beta_{\pi}^a(H_0)$  и по этой точке осуществляется калибровка лидарного сигнала на всей трассе зондирования (метод калибровки лидарного сигнала [3]). Как правило,  $H_0$  выбирается на конце трассы зондирования. При вертикальном зондировании в тропосфере, когда концентрация аэрозоля с высотой спадает практически по экспоненте, неточность задания  $\beta_{\pi}^a(H_0)$  вносит незначительную погрешность в определение коэффициента обратного аэрозольного рассеяния на остальных высотах. При использовании метода калибровки в стратосфере предполагается наличие участка, на котором аэрозоль отсутствует, и точка калибровки выбирается по минимуму функции  $F(H) = N(H)H^2 / \beta_{\pi}^m(H)$ . Для более рельефного представления особенностей вертикального распределения стратосферного аэрозоля используется отношение рассеяния

$$R(H) = [\beta_{\pi}^m(H) + \beta_{\pi}^a(H)] / \beta_{\pi}^m(H), \quad (3)$$

определяемое согласно представленной методике [4] как

$$R(H) = \frac{N(H)H^2\beta_{\pi}^m(H_0)}{N(H_0)H_0^2\beta_{\pi}^m(H)T_m^2(H - H_0)}. \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что случайную ошибку измерений в пренебрежении неточностью задания профиля молекулярного рассеяния и оценки прозрачности атмосферы можно представить в виде

$$\frac{\delta R(H)}{R(H)} = \sqrt{\frac{N(H) + N_{\text{фон}}}{[N(H)]^2} + \frac{N(H_0) + N_{\text{фон}}}{[N(H_0)]^2}}. \quad (5)$$

## 3. Интеркалибровка лидара и первые результаты измерений

Апробация работоспособности лидара СурГУ и проверка идентичности данных измерений осуществлялись в г. Томске сопоставлением результатов одновременного лидарного зондирования характеристик обратного рассеяния аэрозоля, получаемых с помощью двух лидаров. В качестве примера результатов проведенных интеркалибровочных измерений лидарами СурГУ и ИОА СО РАН в режиме счета фотонов на рис. 3 приведены профили отношения рассеяния, полученные 28 февраля 2006 г. в г. Томске.

Накопление лидарных сигналов, на основе которых были получены представленные на рис. 3 профили, осуществлялось по 50 000 лазерных импульсов. По времени данный процесс занимает примерно 1 ч 20 мин. Пространственное разрешение профилей составляет 400 м.

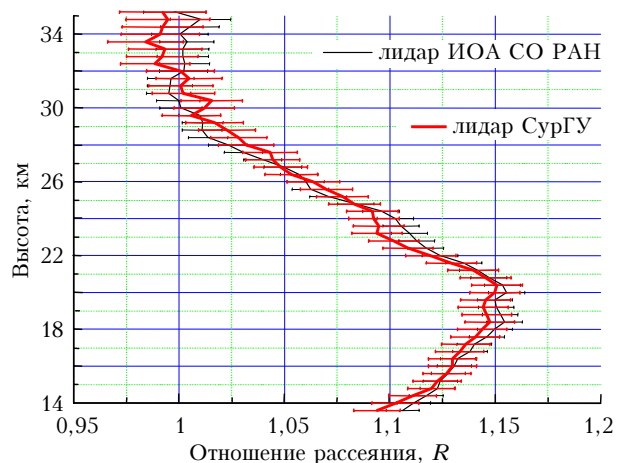


Рис. 3. Вертикальные профили отношения рассеяния, полученные в Томске 28 февраля 2006 г. во время интеркалибровочных измерений лидарами СурГУ и ИОА СО РАН

Во время проведения экспериментов атмосфера была не совсем чистой, наблюдалась облачность на высотах 3 и 10 км, поэтому лидарные сигналы на дальних участках трассы зондирования дополнительно

сглаживались методом скользящего среднего по пяти точкам. Из рис. 3 видно, что вертикальная стратификация аэрозоля идентична, а значения  $R(H)$  в пределах диапазона случайных ошибок совпадают.

В этот же период (в Томске) была проведена интеркалибровка лидаров СурГУ и ИОА СО РАН и для токового (аналогового) режима регистрации, используемого для тропосферных исследований. Ее результаты дали также хорошее совпадение.

В качестве иллюстрации работоспособности лидара, размещенного в СурГУ, на рис. 4 приведен результат одновременного зондирования вертикального распределения аэрозольной составляющей воздуха в диапазоне высот 1–30 км.

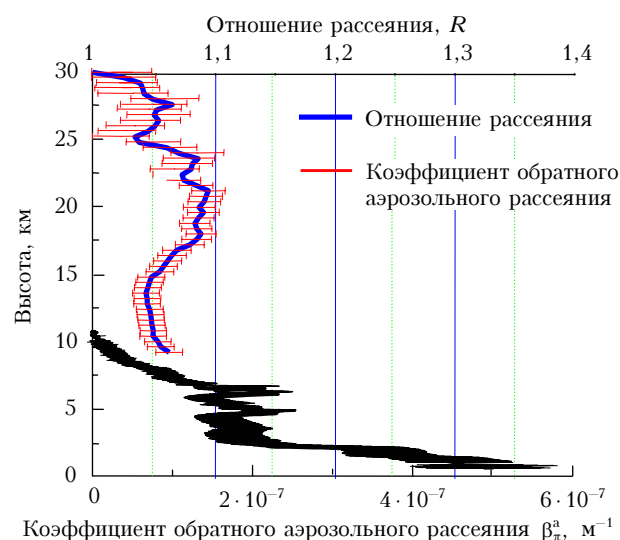


Рис. 4. Вертикальные профили отношения рассеяния (верхняя шкала и верхняя кривая) и коэффициента обратного аэрозольного рассеяния (нижняя шкала и нижняя кривая), полученные 27.04.06 в г.Сургуте

Нижний профиль коэффициента обратного аэрозольного рассеяния получен при регистрации лидарного сигнала в аналоговом режиме. Толщина кривой соответствует величине ошибки измерений с учетом всех погрешностей восстановления  $\beta_{\pi}^a(H)$ . Верх-

няя кривая – профиль отношения рассеяния, полученный в режиме счета фотонов, также с нанесенным на него диапазоном ошибки измерений согласно выражению (5). Время накопления представленных профилей примерно 40 мин. Полученные результаты зондирования аэрозольной стратификации в атмосфере являются типичными для условий «фоновое» ее состояния и при наличии динамических оптически тонких аэрозольных слоев в тропосфере.

## Заключение

Таким образом, лидар Сургутского государственного университета позволяет оперативно и регулярно, с достаточно хорошей точностью получать рассеивающие характеристики аэрозоля в направлении назад, практически от слоя перемешивания до высот 30–35 км. Лидар является еще одной действующей точкой наблюдений сети лидарных станций CIS-LiNet за состоянием аэрозольной компоненты атмосферного воздуха, расположенной в субполярных широтах.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Института физики НАН Беларуси, обеспечившим лидар аналоговым режимом регистрации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Международного научно-технического центра (проект № В-1063), Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 05-05-64518) и интеграционного проекта СО РАН № 3.14.

1. Зуев В.В., Зуев В.Е., Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Ельников А.В., Невзоров А.В. Климатология стратосферного аэрозоля и озона по данным многолетних наблюдений на Сибирской лидарной станции // Оптика атмосф. и океана. 2003. Т. 16. № 8. С. 719–724.
2. Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Невзоров А.В. Модернизация измерительного комплекса Сибирской лидарной станции // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 17. № 10. С. 857–864.
3. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.
4. Ельников А.В., Маричев В.Н., Шелевой К.Д., Шелефонтьев Д.И. Лазерный локатор для исследования вертикальной стратификации аэрозоля // Оптика атмосф. 1988. Т. 1. № 4. С. 117–123.

*A.V. El'nikov, V.D. Burlakov, S.I. Dolgii, V.V. Zuev, A.V. Nevzorov, I.I. Plusnin, S.M. Sysoev, K.I. Bushmeleva, M.S. Chernyi. Lidar system for aerosol sensing in Surgut city in the framework of CIS-LiNet project.*

Lidar station of the Surgut State University being one of the points of a net of CIS-LiNET lidar stations is described. The lidar is oriented to studies of the atmosphere aerosol component both in troposphere and stratosphere. A schematic view of the lidar is given together with a brief description of the used methods for determination of aerosol backscattering characteristics. Results of intercalibration with the lidar operating in the photon counting mode are presented.