

**А.В. Ельников, В.Н. Маричев, К.Д. Шелевой, Д.И. Шелефонтьук**

## **ЛАЗЕРНЫЙ ЛОКАТОР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СТРАТИФИКАЦИИ АЭРОЗОЛЯ**

В статье сообщается о лазерном локаторе на основе телескопа с зеркалом диаметром 1 метр для получения вертикального распределения аэрозоля. Приводятся его блок-схема и технические характеристики. Дается описание как оптической части, так и системы регистрации с вычислительным комплексом. Представлены методика обработки результатов измерений и оценка их ошибки. В качестве иллюстрации работы лидара и демонстрации его возможностей приведены профили, позволяющие проанализировать ход вертикального распределения аэрозоля для лета и зимы.

### **Введение**

Проблеме контроля различных параметров стратосферного воздуха в последнее время уделяется все больше внимания, поскольку выявлено активное влияние этого слоя атмосферы на глобальные процессы, происходящие как в самой атмосфере, так и на земной поверхности. Большую роль при этом играет аэрозоль, количественное содержание которого в нормальных условиях для нижней стратосферы зависит от места и сезона наблюдений и составляет по коэффициенту обратного рассеяния  $1 \div 25\%$  от молекулярной составляющей воздуха на соответствующих высотах [1, 2]. Вместе с тем известно, что для Антарктиды и Арктики в осенне-зимний период аэрозоль превышает молекулярную составляющую воздуха в несколько раз [3, 4]. Такое же и большее превышение наблюдается в разных точках земного шара и довольно длительное время после мощных извержений вулканов, когда огромное количество пепла и газов выбрасывается в атмосферу и горизонтальным движением воздушных масс переносится на большие расстояния [5, 6, 7].

Все эти изменения аэрозольной составляющей воздуха, естественно, оказывают сильное влияние на астроклимат, тепловой баланс и другие процессы взаимодействия «Земля—атмосфера». Поэтому перенос аэрозоля, его суточные и сезонные вариации, высотное и региональное распределения представляют большой интерес для широкого круга специалистов. Особую ценность данная информация будет иметь при проведении регулярных и систематических измерений в глобальном масштабе. Наиболее полно условиям систематичности и регулярности отвечают лазерные методы зондирования атмосферы, а глобальности — распределенная по всему земному шару сеть лазерных локационных станций.

Начало образованию такой сети положено созданием станций на Гавайях и Ямайке (США) [1, 8], Кольском полуострове [9], Европейской части СССР [10], в Японии [6], ФРГ [7], Италии [5].

В Западной Сибири лидарные исследования стратосферного аэрозоля были начаты с 1974 г. [11, 12]. Для проведения регулярных наблюдений за стратификацией аэрозоля в данном регионе была создана вторая лидарная станция на базе более мощного приемного телескопа с диаметром 1 м.

В статье приводятся описание указанного лидарного комплекса по зондированию стратосферного аэрозоля и некоторые результаты, полученные за время его работы.

### **Принцип работы и техническое описание лидара**

Обычно в основе лазерного дистанционного зондирования средней атмосферы лежит упругое рассеяние импульсного лазерного излучения как на частицах, так и на молекулах воздуха. Приходящее с разных высот с соответствующей временной задержкой, оно несет информацию о распределении исследуемых параметров атмосферы по различным высотам. На аналогичном принципе построен и рассматриваемый лидар. Он выполнен в виде стационарного комплекса (блок-схема дана на рис. 1), ниже приведены его технические характеристики.

В качестве источника излучения служит импульсный твердотельный лазер ЛТИ-701 (2) с непрерывной накачкой активного элемента (алюмоиттриевого граната), модуляция излучения которого осуществляется акусто-оптическим затвором с частотой 3 кГц.

Испущенный световой импульс с  $\lambda = 532$  нм при помощи поворотного зеркала (3) попадает в коллимирующую систему (4) и затем направляется в атмосферу.

Рассеянное в атмосфере в направлении назад лазерное излучение принимается телескопом, выполненным по схеме Ньютона с главным зеркалом (5) диаметром 1 м, после чего диагональным зеркалом (6) через полевую диафрагму (7), находящуюся в совмещенном фокусе главного зеркала и согласующего объектива (8), направляется на интерференционный фильтр (9). Прошедшее через фильтр излучение попадает на собирающий объектив (10), в фокусе которого расположен фотокатод ФЭУ (11).

Технические характеристики лидара

Передатчик	
Длина волны излучения . . . . .	532 нм
Частота посылок . . . . .	3 кГц
Длительность импульса . . . . .	0,2 мкс
Средняя мощность . . . . .	1 Вт
Расходимость луча . . . . .	$10^{-4}$ рад
Приемник	
Диаметр приемного зеркала . . . . .	1 м
Угол поля зрения . . . . .	$10^{-3}$ рад
Интерференционный фильтр	
полоса пропускания . . . . .	1 нм
пропускание на 532 нм . . . . .	46%
Фотодетектор . . . . .	ФЭУ-130
Система регистрации	
Счетчик фотонов С-4Б	
количество каналов . . . . .	4
количество временных интервалов . . . . .	128
длина временного интервала . . . . .	1,67 мкс
Счетчик фотонов Д1	
количество каналов . . . . .	1
количество временных интервалов . . . . .	4096
длина временного интервала . . . . .	78 нс
УВК «Ирзар-50М» (на базе ЭВМ «Электроника-60»)	
ОЗУ . . . . .	28 кбайт

С фотоумножителя, работающего в режиме счета фотонов, сигнал, преобразованный в одноэлектронные импульсы, поступает на предварительный усилитель (12) и амплитудный дискриминатор (13), которые размещены вблизи ФЭУ в отдельном экранированном блоке.

В качестве регистраторов стандартизованных импульсов с дискриминатора могут использоваться два быстродействующих устройства (15), выполненных в виде модулей ЭВМ «Электроника-60». Параметры регистраторов — счетчиков фотонов представлены выше. Запуск счетчиков осуществляется быстродействующим фототранзистором (1), расположенным со стороны глухого зеркала лазера.

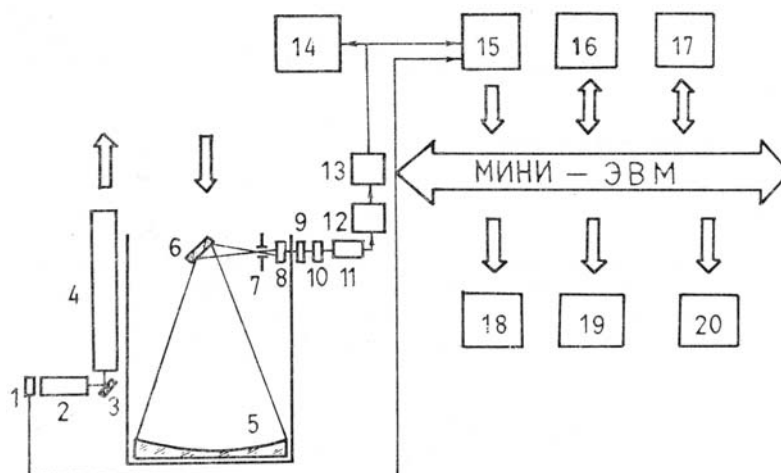


Рис. 1. Блок-схема лазерного локатора

Первый счетчик С-4Б [13] дает возможность получать одновременно по четырем независимым каналам информацию до 33 км с разрешением 250 м, но данный дискрет может аппаратно изменяться в зависимости от решаемых задач. Второй счетчик выполнен на более современной элементной базе, что позволяет повысить потолок зондирования до 47 км и при этом улучшить пространственное разрешение до 12 м.

Полученное в буферной памяти счетчиков фотонов временное распределение пришедших с трассы эхо-сигналов передается в ОЗУ ЭВМ, в котором происходит их суммирование до тех пор, пока число запускающих устройство лазерных импульсов не достигнет числа, заданного программно.

Обычно это число порядка  $10^6$ , что соответствует времени накопления эхо-сигналов  $13 \div 15$  мин. Затем накопленная информация записывается в виде файла на ПЗУ ЭВМ.

В качестве мини-ЭВМ используется универсальный комплекс «Ирзар-50М» на базе «Электроника-60», в состав которого входят два накопителя СМ 5400-00/12 (17) по 2,5 Мбайта, системный терминал 15-ИЭ-00.013 (16) и печатающее устройство DZM-180 (18). Кроме этого, к ЭВМ подключены цветной дисплей (20) и графопостроитель (19) для отображения получаемой информации в графическом виде. Дисплей представляет собой цветной телевизор «Электроника Ц-401» с приводом в стандарте Э-60, а графопостроитель — двухкоординатный самописец «ENDIM», связанный с ЭВМ при помощи интерфейсной платы И-5. Для визуализации регистрируемых эхо-сигналов с ФЭУ используется осциллограф С1-92 (14).

Обработка принятых сигналов, извлечение информации о высотном распределении аэрозоля и представление ее в удобном для восприятия виде осуществляется на этом же вычислительном комплексе с помощью программного обеспечения, функционирующего в операционной системе RT-11 и состоящего из комплекса программ и модельных представлений об атмосфере. Среди программ можно отметить следующие: управление работой счетчиков, предварительный просмотр полученных данных, введение и обработка данных метеозондирования и основной программы обработки, осуществляющей расчет и затем документирование. Программы написаны на языке высокого уровня «Паскаль», кроме подпрограммы, производящей передачу и суммирование данных из буфера счетчика в ОЗУ ЭВМ, написанной на языке «Макроассемблер».

### Методика обработки данных

Для обработки эхо-сигналов при одночастотном зондировании вертикальной стратификации аэрозоля наиболее часто используется методика калибровки сигнала по молекулярному рассеянию [14].

Отношение рассеяния  $R(H) = [\beta_\alpha(H) + \beta_M(H)] / \beta_M(H)$ , являющееся одной из основных характеристик при описании вертикального распределения аэрозоля, из уравнения лазерной локации,

$$N(H) = C \cdot T^2(H) \cdot [\beta_\alpha(H) + \beta_M(H)] \cdot H^{-2} + N_\Phi \quad (1)$$

может быть получено в виде

$$R(H) = \frac{[N(H) - N_\Phi] \cdot H^2}{CT \cdot T^2(H) \cdot \beta_M(H)}, \quad (2)$$

где  $H$  — высота;  $\beta_\alpha(H)$  — коэффициент обратного аэрозольного рассеяния;  $\beta_M(H)$  — коэффициент обратного молекулярного рассеяния;  $C$  — аппаратная постоянная лидара, включающая площадь приемного телескопа, пропускание приемо-передающего тракта, энергию лазерного импульса, квантовую эффективность фотодетектора;  $T^2(H)$  — квадрат прозрачности атмосферы;  $N(H)$  — лидарные эхо-сигналы с трассы;  $N_\Phi$  — фоновый сигнал.

В приведенном уравнении (2) неизвестными величинами являются  $C$ ,  $T^2(H)$  и  $\beta_M(H)$ .

Квадрат прозрачности атмосферы  $T^2(H)$  может быть определен по моделям атмосферы [15]. Что касается коэффициента обратного молекулярного рассеяния  $\beta_M(H)$ , то его также можно взять из модели [15] или же рассчитать из метеорологических измерений через давление и температуру.

Оставшаяся неизвестной аппаратная константа  $C$  определяется следующим образом.

Для функции  $R(H)$  отыскивается минимум в интервале высот, где величины  $N(H)$ ,  $T^2(H)$ ,  $\beta_M(H)$  могут быть достаточно точно определены. Для высоты  $H_m$ , на которой  $R(H)$  принимает минимальное значение  $R_m$ , полагают, что определяющим с этой высоты является молекулярное рассеяние и  $R(H_m)$  близко к единице. Таким образом, калибровочная константа равна

$$C = \frac{[N(H_m) - N_\Phi] \cdot H_m^2}{T^2(H_m) \cdot \beta_M(H_m)} \cdot \frac{1}{R(H_m)}.$$

Тогда выражение для отношения рассеяния имеет вид

$$R(H) = \frac{[N(H) - N_\Phi] \cdot H^2 \cdot \beta_M(H_m)}{[N(H_m) - N_\Phi] \cdot H_m^2 \cdot \beta_M(H) \cdot T^2(H - H_m)} \cdot R_m.$$

Оценка ошибки при измерении отношения рассеяния для данного лидара с учетом всех предположений методики обработки была подробно проведена в [14] на основе работы [2].

Конечная формула для оценки относительной погрешности имеет вид

$$\frac{\delta R(H)}{R(H)} = \sqrt{\frac{N(H)}{[N(H) - N_{\phi}]^2} + \frac{N_m}{(N_m + N_{\phi})^2} + K},$$

где  $H$  — высота;  $N(H)$  — лидарные эхо-сигналы с трассы;  $N_m$  — лидарный эхо-сигнал с трассы в точке калибровки;  $N_{\phi}$  — фоновый сигнал;  $K$  — постоянная величина, появляющаяся вследствие предположений методики обработки и оцениваемая величиной  $3 \times (0,01)^2$ .

В таблице приведены оценки ошибки измерений, рассчитанные для реальных эхо-сигналов, полученных 30 января 1987 года на регистрирующем устройстве С-4Б с временем накопления  $\approx 13$  минут по 655350 выстрелам.

$H$ , км	5	10	15	20	25	30
$\frac{\delta R}{R} \times 100 \%$	3,3	3,3	3,4	3,7	4,6	6,8

Для более полного учета ошибок измерений необходимо отметить вероятное появление импульсов последействия [16, 17] при засветках ФЭУ интенсивными потоками света от ближней зоны. Особенно сильно их влияние сказывается при работе ФЭУ в большом динамическом диапазоне. Так, добавка за счет импульсов последействия в области слабых сигналов может привести к существенному искажению результатов измерений. Учет влияния такого рода аппаратных искажений довольно сложен и требует отдельного рассмотрения. В нашем случае мы ограничились зондированием в интервале высот 5—28 км, так как для представленного лидара эти искажения начинают сказываться с высот 30 км.

#### Некоторые результаты лидарного зондирования и их анализ

В качестве иллюстрации работоспособности лидара по зондированию вертикальной стратификации аэрозоля в нижней стратосфере и верхней тропосфере представлены профили отношения рассеяния, сделанные летом (рис. 2,а) и зимой (рис. 2,б) 1986 и 1987 гг. Измерения проводились ночью при безоблачном небе в условиях устойчивой погоды.

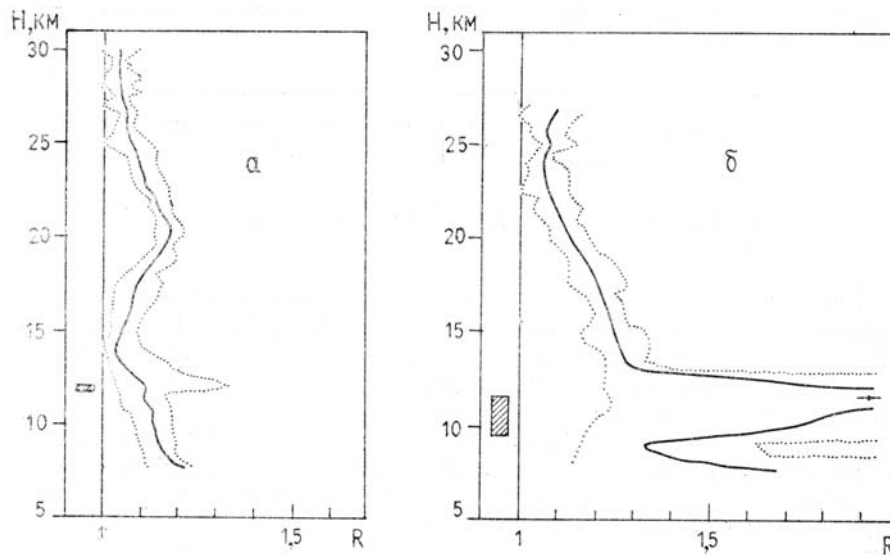


Рис. 2. Средние профили отношения рассеяния  $R$  для лета (а); для зимы (б), сплошная линия — средний профиль  $R$ , точки — коридор значений

На рис. 2,а приведен средний профиль отношения рассеяния  $R$ , полученный по результатам зондирования в июле 1986 г. (3 профиля) и июле 1987 г. (2 профиля) и коридор значений  $R$  для профилей, по которым проводилось усреднение. Аналогичные результаты приведены и на рисунке 2,б, но с усреднением по двум профилям за январь 1986 г., трем — за январь 1987 г. и одному — за февраль 1987 г. Кроме этого, на рисунке слева (внизу) представлено положение тропопаузы. Для летних профилей она оказалась практически на одной высоте. Зимой же ее положение значительно отличалось, особенно для суток, в которые проводились измерения.

Как видно из рисунка 2,а, в распределении аэрозоля для лета наблюдаются два минимума — первый в районе тропопаузы ( $H_{\text{тр}} + 2$  км), второй на высоте  $25 \div 28$  км и максимум на высоте 20 км.

Для последнего величина отношения рассеяния  $R_{\max}$  равна 1,2. Подобная картина в распределении аэрозоля по высоте для нормальных невулканических условий имеет место для различных пунктов зондирования [1, 2].

Что касается зимы, то для этого сезона в распределении аэрозоля имеет место только один минимум на высоте  $23 \div 24$  км. Это положение минимума оказывается ниже примерно на 4 км, чем положение аналогичного минимума для летнего сезона. Вообще, согласно полученным данным (см. рис. 2,б), можно говорить о смещении вниз и увеличении содержания всего стратосферного аэрозольного слоя. При этом в районе тропопаузы часто наблюдается слоистая структура с повышенным содержанием аэрозоля, различающаяся как по протяженности ( $300 \text{ м} \div 4 \text{ км}$ ), так и по плотности.

В частности, для представленного среднего профиля  $R_{\max} = 2,4$ , а максимальное значение для отдельных усредняемых профилей равно 6,3.

При отсутствии слоев отношение рассеяния в районе тропопаузы равно 1,25–1,4, и второй минимум в распределении аэрозоля, как для летних условий, не наблюдается.

## Заключение

Рассматриваемый лидар, являющийся еще одной локационной станцией в сети станций наблюдений за состоянием атмосферного воздуха, позволяет оперативно и регулярно, с достаточно большими точностью и пространственным разрешением, получать профили отношения рассеяния до высоты  $\approx 28$  км.

Полученные по результатам работы лидара, начиная с 1986 г., профили отношения рассеяния позволили рассмотреть ход вертикального распределения аэрозоля для летнего и зимнего сезонов средних широт и выявить некоторые характерные особенности.

1. Philip M.T., Kent G.S., Ottway M.T. — J. of Atmosph. Scienc, 1985, v. 42, No. 9, pp. 967–974.
2. Philip B.R., Swisster T.J., McCormick M.P. — Appl. Opt., 1979, v. 18, No. 22, p. 3783–3797.
3. McCormick M.P., Hamill P., Farrukh U.O. — J. of Meteorological Society of Japan, 1985, v. 63, No. 2, p. 267–276.
4. Kent G.S., Poole L.R., McCormick M.P. — J. Atmosph. Scienc, 1986, v. 43, No. 20, pp. 2149–2161.
5. D'Altorio A., Visconti G. — Geof. Int., 1984, v. 32–2, pp. 233–241
6. Uchino O., Takahashi K., Tabata I., Akita I., Okada Y., Natio K. J. of the Meteorological Society of Japan, 1984, v. 62, No. 4, pp. 679–687.
7. Reiter R. et al. — Geophys. Res. Lett., 1980, v. 7, pp. 1099–1101.
8. SEAN Bulletin, 1986, v. 11, No. 4.
9. Байдалов С.И., Мизин Ю.Ф., Потапов Р.И. — Тез. докл. 3-го Всес. совещания. Полярная ионосфера и магнитосферно-ионные связи. Апатиты: Изд-во Кольского филиала АН СССР, 1984, с. 78–80.
10. Костко О.К., Кашенцев Б.П., Тулинов К.В. — Тез. докл. VIII Всес. симпозиума по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Ч. 1. Томск: Изд. ИОА СО АН СССР, 1984, с. 77–79.
11. Зуев В.Е., Козлов Н.В., Макиенко Э.В., Наац И.Э., Самохвалов И.В. — Изв. АН СССР. ФАО, т. 13, № 6, 1977, с. 648.
12. Кауль Б.В., Краснов О.А., Самохвалов И.В., Шелевой В.Д. — Тез. докл. VIII Всес. симпозиума по лазерному и акустическому зондированию атмосферы (ч. II), Томск: Изд. ИОА СО АН СССР, 1984, с. 58–60.
13. Надеев А.И., Шелевой К.Д. Система счета фотонов С–4Т для лазерного зондирования атмосферы. — Деп. в ВИНТИ № 6950-84, 1984 г.
14. Маричев В.Н., Ельников А.В. — Тез. докл. IX Всес. симпозиума по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Томск: Изд. ИОА СО АН СССР, 1987, ч. 1, с. 154–159.
15. Ипполитов И. И., Комаров В.С., Мицель А.А. — В кн.: Спектроскопические методы зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1985.
16. Ветохин С.С., Гулаков И.Р., Перцев А.Н. и др. Одноэлектронные фотоприемники. — М.: Энерго атомиздат, 1986.
17. Аршинов Ю.Ф., Бобровников С.М., Надеев А.И., Шелевой К.Д. — Тез. докл. VIII Всес. симпозиума по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Ч. II. Томск: Изд. ИОА СО АН СССР 1984, с. 280–282.

Институт оптики атмосферы  
СО АН СССР, Томск  
СКБ научного приборостроения  
«Оптика» СО АН СССР, Томск

Поступила в редакцию  
11 февраля 1988 г.

A.V. El'nikov, V.N. Marichev, K.D. Shelevoy, D.I. Shefontyuk. **Laser Radar for Sensing Vertical Stratification of Atmospheric Aerosol.**

A ground-based laser radar for measuring vertical profiles of atmospheric aerosol is proposed. The lidar employs a 1 m diameter mirror telescope. The block-diagram and technical data on the setup in question are presented. The optics used and the computing-recording system are described. Ad hoc algorithms for lidar data processing and measurement error estimation are discussed. The lidar operation and capabilities are illustrated using experimental profiles of aerosol altitudinal variations measured in summer and in winter.