

А.Н. Бородавко, Н.П. Воробей, В.И. Губский, С.В. Денисов, З.И. Заулочная, А.П. Иванов, С.В. Коронкевич, **С.И. Курьиндин**, М.И. Новик, Е.В. Рыбальченко, А.С. Слесарь, Н.Е. Слабков, А.А. Сычев, Н.С. Хлопков, А.П. Чайковский, М.Е. Шишкина, С.С. Хмелевцов, Ю.Г. Кауфман

## ЛИДАРНАЯ СТАНЦИЯ ДЛЯ ЗОНДИРОВАНИЯ СТРАТОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ

Дается описание лидарной станции для зондирования стратосферы. Приводятся результаты зондирования стратосферного аэрозоля на длинах волн 532 и 1064 нм.

Стратосферный аэрозоль (СА) является существенным климатообразующим фактором. Вулканическая активность, хозяйственная деятельность человека вызывают изменения параметров стратосферного аэрозольного слоя. Для своевременного предсказания возможных климатических изменений необходимо создать систему мониторинга СА, которая должна обеспечить проведение систематических глобальных измерений параметров СА с точностью и пространственно-временным разрешением, достаточными для использования этих данных в моделях климата.

Опыт исследований параметров СА показывает, что основой системы мониторинга стратосферы должны являться лидарные станции наземного базирования, а также лидары, установленные на борту самолетов, космических кораблей. По этой причине задача создания соответствующей лидарной аппаратуры приобретает важное практическое значение. В настоящей работе описывается стационарная лидарная станция, разработанная в Институте физики и ЦКБ с ОП АН БССР, предназначенная для использования в сети контроля параметров СА.

В таблице приведены технические характеристики лидарных станций для зондирования СА, созданных в нашей стране и за рубежом. Лидар АНБ–314 разрабатывался как многофункциональный прибор, предназначенный для исследования концентрации и микроструктуры стратосферного аэрозоля посредством измерения энергетических и поляризационных характеристик локационного сигнала в различных спектральных интервалах. Блочный способ построения приемопередающей части, многоканальная система регистрации расширяют возможности модернизации лидара при изменении программы эксперимента. В настоящее время исследования СА проводятся на одной и двух длинах волн. Установкой дополнительного излучателя число рабочих длин волн может быть увеличено до четырех.

Лидарная станция АНБ–314 представляет собой прибор, состоящий из приемопередающей части, блока управления, системы регистрации и обработки данных, блока питания лазера и блока охлаждения. Оптическая схема лидара приведена на рис. 1. Основой приемопередающей части лидара является зеркальный объектив 2 типа Кассегрена с фокусным расстоянием 1700 мм. Особенностью прибора является реализованное в блоке 3 эффективное деление регистрируемого излучения на четыре компонента. Оптические элементы делителя излучения расположены на подвижной плите, имеющей несколько фиксированных рабочих положений. При этом вход и выходы блока оптически связаны соответственно с полевой диафрагмой 4 и фотоприемниками 14. В зависимости от установленных оптических элементов и позиции подвижной плиты производится селекция излучения по длинам волн или поляризационным характеристикам. В описываемом варианте исполнения прибора предусмотрены два режима работы: измерение интенсивности локационного сигнала на двух длинах волн с дополнительным делением излучения 1:10 и измерение степени деполяризации излучения на двух длинах волн.

Регистрация излучения осуществляется в режиме счета фотонов посредством ФЭУ, входящих в состав четырех однотипных фотоприемных модулей 14, каждый из которых содержит ФЭУ, плату усилителя–дискриминатора с регулируемым порогом, термоохладительник и подключен к отдельному регулируемому блоку питания. Защита ФЭУ от перегрузки вследствие засветки сигналом из ближней зоны осуществляется посредством вращающегося диска 5, синхронизованного с блоком питания лазера.

Излучатель лидара 1 создан на основе лазера 16 на алюмоиттриевом гранате типа ИЛТИ–405 (или ИЗ–25–1), включает также телескопическую насадку 15 и узел фотоприемников 17 типа Ф–21 для регистрации энергии посылаемого излучения. Излучатель может размещаться на отдельном поворотном устройстве, что позволяет при необходимости увеличить базу лидара до 10 м. Возможна также установка дополнительного излучателя на лидар для увеличения числа рабочих длин волн. Питание лазера осуществляется блоком типа БПЛ–73/33, синхронизованного сигналами датчика устройства отсечки ближней зоны. Охлаждение лазера и съем тепла с термоохладительников производится автономными блоками охлаждения.

Технические параметры лидаров

Параметры*	Ун-т Вест-Индин, Кингстон [1]	Нагойский ун-т, Нагоя		Ун-т Кушү, Фукуока [5]	Ин-т физики атмосферы, Фраскати [6]	ИОА, Томск, «Стратосфера-1» [7-9]	АН БССР, Минск, «АНБ-314»
		[3]	[4]				
$\lambda_l$ , нм	694	694	694	532	532	532	532
$W_0$ , Дж	1-10	1,5	1,5	0,14	0,5	0,02	0,03
$2\gamma_{из}$ , мрад	0,28	1	3	0,2	0,2	0,25	0,2
$f_M$ , Гц	0,16	0,2	1	10	10	10-100	50
$S_0$ , м <sup>2</sup>	16 (мозаика)	0,125	0,20	0,20	5 (мозаика)	0,20	0,20
$2\gamma_{пр}$ , мрад	0,78	1	—	3,5; 1,6	—	2	2
$\Delta\lambda$ , нм	2	1; 5	1; 2,5	—	—	1,7; 2,4; 12	2
$n$	1	2	2	2	2	1	2
$P$	нет	нет	есть	нет	нет	есть	есть
$G$	—	есть	есть	нет	нет	—	есть
$l$ , м	—	—	—	14	2	2,4	0,4-10

\*  $\lambda_l$  — длина волны;  $W_0$  — энергия импульса;  $2\gamma_{из}$  — расходимость излучения;  $2\gamma_{пр}$  — максимальная частота;  $S_0$  — площадь телескопа;  $2\gamma_{пр}$  — угол приема излучения;  $\Delta\lambda$  — спектральная ширина интерференционных фильтров;  $n$  — количество одновременно регистрируемых длин волн;  $P$  — измерение поляризации;  $G$  — отсечка ближней зоны;  $l$  — база.

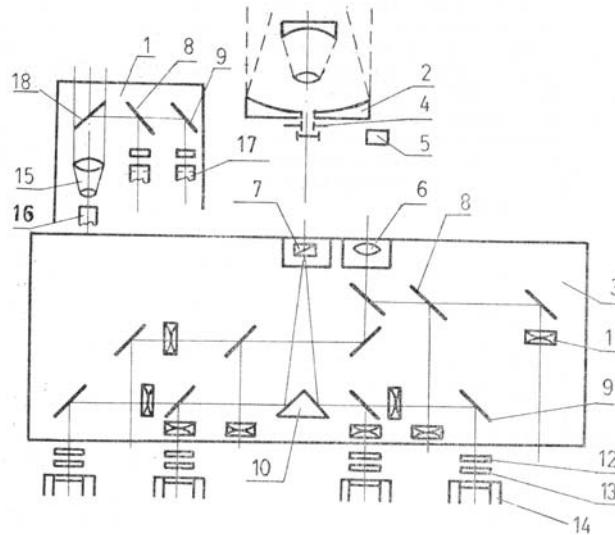


Рис. 1. Оптическая схема лидара: 1 — излучатель; 2 — объектив; 3 — делитель излучения; 4 — диафрагма; 5 — устройство отсечки ближней зоны; 6 — линза; 7 — призма Волластона; 8 — спектроделитель; 9 — зеркало; 10 — призма; 11 — коллективная линза; 12 — нейтральный светофильтр; 13 — интерференционный светофильтр; 14 — ФЭУ; 15 — коллиматор; 16 — лазер; 17 — фотоприемник Ф-21; 18 — пластина

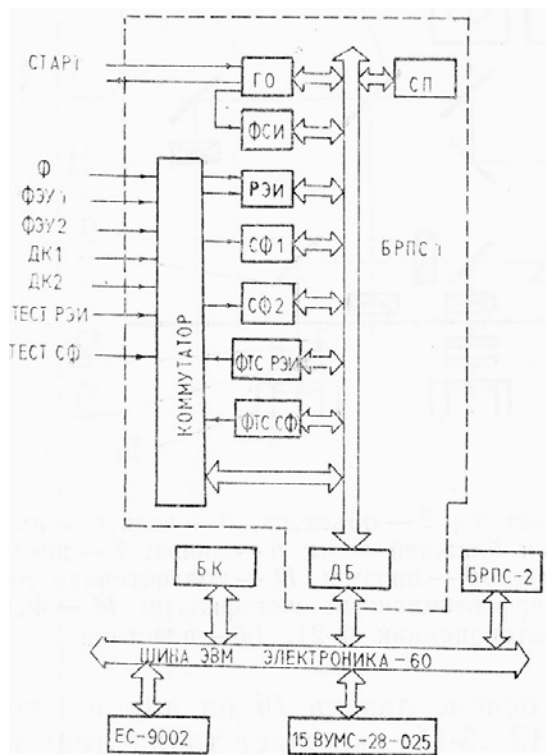


Рис. 2. Блок-схема системы регистрации и обработки данных

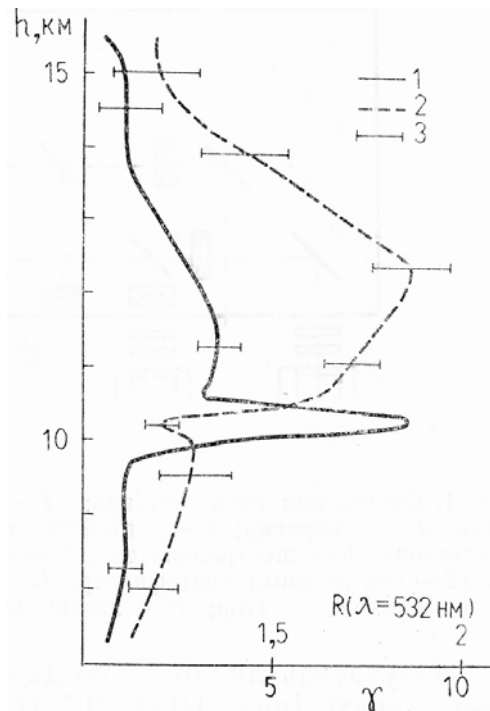


Рис. 3. Результаты зондирования атмосферы на длинах воли 532 и 1064 км: 1 —  $R(\lambda = 532 \text{ нм})$ ; 2 —  $\gamma$ ; 3 — относительное отклонение

Система регистрации и обработки данных состоит из двух идентичных блоков регистрации и преобразования сигнала БРПС, блока контроля БК и вычислительного комплекса 15ВУМС-28-025 (рис. 2). Подключение блоков к ЭВМ осуществляется через унифицированную параллельную магистраль. Регистратор энергии импульса (РЭИ) обеспечивает измерение энергии излученного импульса лазера. Счетчики фотонов СФ1 и СФ2 предназначены для регистрации временного распределения одноэлектронных импульсов ФЭУ. Каждый модуль СФ включает два 8-разрядных счетчика, работающих поочередно. Сигналы с фотоприемника опорного излучения  $\Phi$ , дискриминаторов ФЭУ (ДК1 и ДК2), блока контроля (тест РЭИ, тест СФ) поступают на коммутатор. Формирование старт-

сигнала для блока управления и синхронизация работы блоков системы регистрации обеспечивается опорным генератором (10), изготовленным на основе высокостабильной рециркуляционной схемы с кабельной линией задержки, а также формирователем синхроимпульсов (ФСИ). Формирователь тест-сигнала СФ (ФТС СФ) предназначен для проверки работоспособности СФ и образует серии импульсов, число которых возрастает в каждой серии на один, а частота задается программой ЭВМ. Формирователь тест-сигналов РЭИ (ФТС РЭИ) создает сигналы трапецевидной формы, параметры которых также определяются программой ЭВМ. Стабилизированным источником питания всех функциональных устройств является субблок питания (СП). Дешифратор блока (ДБ) предназначен для расширения магистрали вычислительного комплекса и обеспечивает связь БРПС с ЭВМ.

Для обслуживания лидарной станции разработан комплект специальных инструментов и устройств. В частности, изготовлено съемное устройство, обеспечивающее имитацию оптической оси излучателя в приемном объективе с ошибкой  $\leq 30''$ , что позволяет достаточно просто выполнить в обычном случае трудоемкую операцию юстировки излучателя относительно приемного канала.

Определяющее значение для получения достоверных результатов при лазерном зондировании стратосферы имеет выбор режима работы блоков фотоприемников. При регистрации излучения на длине волны 532 нм использовались ФЭУ-136. Темповой ток данных ФЭУ мал в сравнении с сигналом фоновой засветки уже при комнатной температуре. При выбранном пороге дискриминации частота счета одноэлектронных импульсов составляла величины соответственно порядка 100 и 1000 Гц. Это позволяет применять данные ФЭУ без дополнительного охлаждения. Выбор напряжения питания ФЭУ и уровня дискриминации проводился по обычной методике [10]. Наиболее сложной операцией при наладке фотоприемного блока явилось обеспечение достаточно широкого динамического диапазона фоторегистратора, которое достигалось за счет коррекции напряжения питания ФЭУ и выбора оптимальной схемы узла усилителя-дискриминатора.

Динамический диапазон фоторегистратора на основе ФЭУ-136 при нелинейности не более 5% составил  $\sim 30$  МГц. При засветке ФЭУ импульсным сигналом с интенсивностью, близкой к верхней границе динамического диапазона, возрастают собственные шумы ФЭУ [11]. Поэтому режим работы фотоприемников оптимизировался также по признаку малости дополнительных шумов и постоянной времени их релаксации.

Регистрация излучения  $\lambda = 1064$  нм осуществлялась ФЭУ-83. Особенностью применения данных фотоприемников в режиме счета фотонов является необходимость отбора образцов и охлаждение их до температуры порядка  $-30^\circ\text{C}$ . Частота темновых импульсов при этом составляла  $\sim 2$  кГц.

Обработка результатов зондирования СА проводилась по методике [12]. Рассчитывались профили отношения  $R(h) = \frac{\beta_{\pi,a}(h) + \beta_{\pi,m}(h)}{\beta_{\pi,m}(h)}$  и параметра  $\beta_{\pi,a}(h) = (R-1) \cdot \beta_{\pi,m}$ , где  $\beta_{\pi,a}$  и  $\beta_{\pi,m}$  — соответственно показатели обратного аэрозольного и молекулярного рассеяния. Для оценки  $\beta_{\pi,m}$  использовались данные аэрозондирования.

Результаты испытаний и опытной эксплуатации лидарной установки показали, что прибор позволяет регистрировать локационный сигнал из стратосферы до высоты 30 км ( $\lambda = 532$  нм) и 15 км ( $\lambda = 1064$  нм). Статистическая неопределенность данных при этом составляет не более 5%. Накопление сигнала осуществлялось при количестве посланных импульсов  $\sim 10^4$ . В качестве излучателя использовался лазер ИЗ-25-1. Увеличение дальности зондирования в ИК диапазоне предлагается достигнуть путем увеличения энергии излучения и использования других типов ФЭУ.

Результаты зондирования нижней стратосферы на длинах волн 532 и 1064 нм приведены на рис. 3. Измерения проведены 5 июня 1987 г. Нормирование данных было проведено по сигналу из слоя 15,5–17,5 км, где наблюдался минимум аэрозольного рассеяния. Параметр  $R$  ( $\lambda = 532$  нм) (кривая 1), а также  $\beta_{\pi,a}$  ( $\lambda \sim 532$  нм) были определены в слое 7–30 км. Значения параметра

$\gamma = \frac{\beta_{\pi,a}(\lambda = 532 \text{ нм})}{\beta_{\pi,a}(\lambda = 1064 \text{ нм})}$  восстановлены с удовлетворительной точностью только до 15 км вследствие

уменьшения достоверности статистической оценки данных зондирования в ИК диапазоне. Расчет дисперсии оценки параметра  $\gamma$  проведен аналогично [12]. Повышенное аэрозольное рассеяние наблюдалось в слое под тропопаузой ( $h_{\text{тр}} = 10,5$  км). Аэрозольный слой с повышенным значением  $\gamma$  был обнаружен на высоте 11–13 км. Формирование аэрозольного слоя непосредственно над тропопаузой в конце мая — начале июня 1987 г. было зафиксировано на лидарных станциях в различных районах земного шара [13]. Измерения посредством фотоэлектрических счетчиков показали [13], что в этом слое наблюдалось аномально высокое содержание мелкодисперсных частиц.

Данные о величине интегрального показателя обратного рассеяния  $\hat{\beta}_{\pi,a} = \int_{h_{\text{тр}}}^{h_1} \beta_{\pi,a}(h) dh$ , где  $h_1 = 30$  км, полученные в период с ноября 1984 г. по июль 1987 г., представлены на рис. 4. Приведены также результаты аналогичных измерений, выполненных другими авторами [14, 15]. Значения параметра  $\hat{\beta}_{\pi,a}$  пересчитаны на длину волны  $\lambda = 694$  нм, поскольку в большинстве станций использу-

ются в качестве излучателей лазеры на рубине. Отношение  $\beta_{\pi,a}(\lambda = 532 \text{ нм})/\beta_{\pi,a}(\lambda = 694 \text{ нм})$  по оценкам различных авторов равно  $2 \pm 0,2$ . Величина  $\beta_{\pi,a}$  для фоновое состояние приведена в предположении роста фоновой концентрации СА на 4–9% в год [16]. Как видно из рис. 4, происходит процесс уменьшения величины  $\hat{\beta}_{\pi,a}$  к ее фоновому значению после значительного возмущения, вызванного извержением вулкана Эль-Чичон в апреле 1982 г.

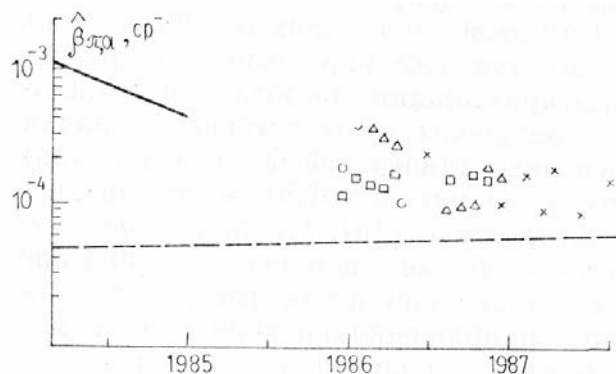


Рис. 4. Трансформация интегрального показателя обратного рассеяния: сплошной линией — среднее значение по данным ряда станций [15]; пунктирной — фоновое значение  $\beta_{\pi,a}$  с учетом систематического роста [16];  $\square$  — Мауна-Лоа (Гавайи, США) [15];  $\triangle$  — Хамптон (Виргиния, США) [15];  $\circ$  — Обнинск [14];  $\times$  — Минск

Результаты опытной эксплуатации лидара АНБ–314 в течение 1985–1987 гг. показали, что данная лидарная станция имеет технические и эксплуатационные показатели, позволяющие использовать ее в системе мониторинга стратосферного аэрозоля.

1. Лазерный контроль атмосферы/Под ред. Э. Д. Хинкли. — М.: Мир, 1979, с. 105.
2. Reiter R., Jdger H., Carnuth W., Funk W. — Arch. Met. Geoph. Biokl., Ser. B, 1979, v. 27, p. 121.
3. Iwasaka Y., Mita A., Isono K. — Rep. Ion. Space Res. Jap., 1976, v. 30, p. 51.
4. Iwasaka Y., Hirasawa T., Fuhunishi H. — J. Geomag. Geoelectr., 1985, v. 37, p. 1087.
5. Shibata T., Fujiwara M., Hirono M. — Jap. J. Appl. Phys., 1980, v. 19, p. 2205.
6. Adriani A., Gongeduti F., Fiorrol, Gobbi G. P. — Geoph. Res. Lett., 1983, v. 10, p. 1005.
7. Кауль Б.В., Самохвалов И.В., Козлов Н.В., Деев В.Н. — В кн.: Вопросы дистанционного зондирования атмосферы. — Томск, 1975, с. 30.
8. Зуев В.Е., Жильцов В.И., Козинцев В.И. и др. — В кн.: VIII Всес. симп. по лазерному и акустическому зондированию атмосферы (тезисы докладов, ч. 1). — Томск, 1984, с. 3.
9. Кауль Б.В., Краснов О. А., Самохвалов И.В., Шелевой В.Д. — В кн.: VIII Всес. симп. по лазерному и акустическому зондированию атмосферы (тезисы докладов, ч. 1). — Томск, 1984, с. 58.
10. Одноэлектронные приемники/С.С. Ветохин, И.Р. Рудаков, А.Н. Перцев и др. — М.: Энергоатомиздат, 1986.
11. Митев В.М., Григоров И.В. — ПТЭ, 1987, № 1, с. 172.
12. Russel P. V., Swisler T. J., McCormick M. P. — Appl. Opt., 1979, v. 18, p. 3783.
13. SEAN Bull., 1986, v. 12, No 6, p. 1.
14. Хмелевцов С.С., Кауфман Ю.Г., Вдовенков А.М. — В кн.: III Всес. совещание по распространению лазерного излучения в дисперсной среде (тезисы докладов, ч. 1). — Обнинск, 1985, с. 102.
15. SEAN Bull., 1986, v. 11, № 1–12.
16. Вулканы, стратосферный аэрозоль и климат Земли/М.Л. Асатуров, М.И. Будько, К.М. Винников и др. — Л.: Гидрометеиздат, 1986, с. 68.

Институт физики АН БССР,  
Центральное конструкторское бюро  
с опытным производством АН БССР, Минск

Поступила в редакцию  
30 декабря 1987 г.

A. N. Borodavko, N. P. Vorobey, V. I. Guьsky, S. V. Denisov, Z. I. Zaulchnaya, A. P. Ivanov, S. V. Koronkevich, S. I. Kuryndin, M. I. Novik, E. V. Rybal'chenko, A. S. Slesar', N. E. Slabkov, A. A. Sychov, N. S. Khlopkov, A. P. Chaikovskiy, M. E. Shishkina, S. S. Khmelevtsov, Ju. G. Kaufman. **Lidar Station for Sounding Stratospheric Aerosol.**

A description of a lidar station for sounding the stratosphere is given. The results of the stratospheric aerosol sounding at 532 and 1064 nm are presented.