

В.Д. Бурлаков, С.И. Долгий, А.В. Невзоров

Модернизация измерительного комплекса Сибирской лидарной станции

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 16.06.2004 г.

Рассматривается модернизированный измерительный комплекс, разработанный на Сибирской лидарной станции для контроля кратковременных и долговременных изменений характеристик стратосферного аэрозольного слоя (САС), озоносферы и температуры средней атмосферы. Измерения характеристик САС осуществляются на длине волны зондирования 532 нм с использованием приемного зеркала диаметром 0,3 м. Приемное зеркало диаметром 2,2 м одновременно позволяет регистрировать сигналы обратного молекулярного рассеяния в высотном диапазоне 30–80 км и сигналы комбинационного рассеяния от молекул азота на длине волны 607 нм в высотном интервале 10–30 км. Одновременная регистрация сигналов дает возможность восстанавливать непрерывный профиль температуры для диапазона высот ~10–75 км. Измерения вертикального распределения озона в стратосфере осуществляются по методу дифференциального поглощения и рассеяния на паре длин волн 308/353 нм с регистрацией лидарных сигналов приемным зеркалом диаметром 0,5 м.

Введение

В настоящее время широко применяемым средством исследований атмосферы и контроля за ее состоянием стали методы дистанционного лазерного зондирования с использованием лидарной техники [1,2]. Особенно результативны многолетние регулярные комплексные измерения нескольких основных параметров и составляющих атмосферы, которые формируют и определяют радиационно-термический режим и в целом климатоэкологическое состояние системы «атмосфера — земная поверхность». Анализ данных длительных рядов комплексных регулярных наблюдений позволяет: разрабатывать региональные эмпирические модели характеристик атмосферы; определять взаимосвязи в динамике исследуемых параметров; определять влияние глобальных атмосферных изменений на региональные изменения; обнаруживать кратковременные возмущения и постепенно накапливающиеся изменения в атмосфере под действием природных и антропогенных факторов; выделять периодические (сезонные, квазидвухлетние и др.) составляющие; определять и прогнозировать тенденции атмосферных изменений.

Так, на наиболее широкомасштабной Международной сети обнаружения стратосферных изменений NDSC (Network for Detection of Stratospheric Change) ведутся лидарные и спектрофотометрические измерения характеристик стратосферного озонового и аэрозольного слоев, газовых составляющих озоновых циклов, радиационных потоков и температуры. Данные длительных рядов подобных наблюдений служат основой для исследований причин и механизмов, определяющих из-

менения озонового слоя Земли; для изучения степени влияния рассеивающих и поглощающих свойств стратосферного аэрозоля природного и техногенного происхождения на процессы переноса радиации и термический режим системы «атмосфера — земная поверхность».

Комплексный подход к исследованиям стратосферы развивается на Сибирской лидарной станции (СЛС) [3] Института оптики атмосферы СО РАН в г. Томске (56,5° с.ш.; 85,0° в.д.), где осуществляются лидарные и спектрофотометрические измерения характеристик стратосферного аэрозольного слоя (САС) (с 1986 г.), озоносферы (с 1989 г.) и температуры средней атмосферы (с 1995 г.). Кроме того, на лидарном комплексе СЛС реализовано зондирование водяного пара в тропосфере и облачности. В зависимости от конкретных программ атмосферных исследований состав и геометрия лидарного приемопередаточного комплекса меняются и модифицируются. Также техника и методика измерений постоянно развиваются и совершенствуются.

В предлагаемой статье рассматривается модернизированный лидарный комплекс, предназначенный в основном для стратосферных измерений. Комплекс дополнен каналом регистрации сигналов обратного комбинационного рассеяния (КР) от 1-го колебательно-вращательного перехода молекул азота (длина волны 607 нм) при их возбуждении излучением 2-й гармоники Nd:YAG-лазера на длине волны 532 нм. Регистрация КР-сигналов от азота позволяет восстанавливать профили температуры в высотном интервале ~10–30 км и осуществлять калибровку лидарных сигналов аэрозольного и молекулярного рассеяния. Подобный метод калибровки

особенно необходим при отсутствии в настоящее время данных аэрологического зондирования вертикальных профилей температуры в стратосфере.

В модернизированной лидарной системе осуществлена комплексная автоматизация выбора и установки рабочих параметров блоков фотоэлектронной регистрации лидарных сигналов с управлением от компьютера. На основе шаговых двигателей разработан автоматизированный оптико-механический юстировочный узел для вывода лазерного излучения в атмосферу и его юстировки относительно оптической оси приемного зеркала. В статье не рассматриваются методические вопросы восстановления характеристик стратосферы из данных зондирования. Приводятся только некоторые новые результаты, иллюстрирующие возможности комплекса.

1. Общая схема лидарного измерительного комплекса

На рис. 1 приведена общая схема сложившегося к настоящему времени лидарного измерительного комплекса СЛС, который включает две независимые лидарные системы: система для измерений характеристик САС и температуры средней атмосферы (рис. 1,а) и лидар для зондирования вертикального распределения концентрации озона в стратосфере (рис.1,б). (При замене приемной спектральной оптики этот лидар позволяет также измерять влажность в тропосфере.)

В таблице приведены основные технические характеристики лазерных источников и приемных оптических элементов комплекса. Далее рассмотрим работу отдельных систем комплекса.

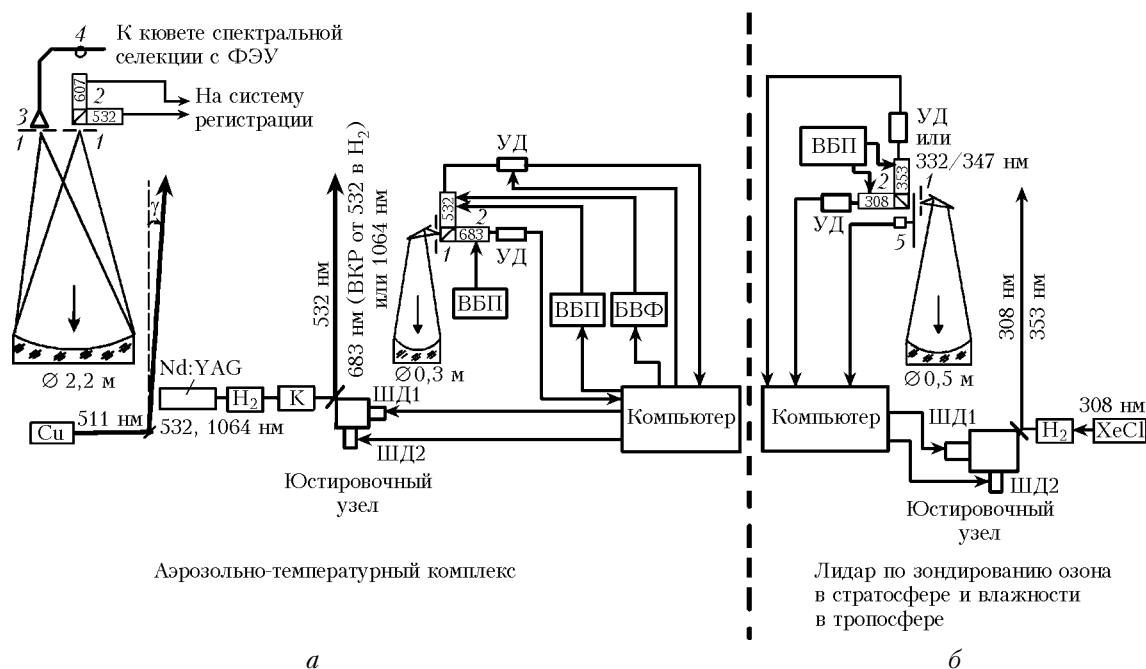


Рис. 1. Схема измерительного комплекса Сибирской лидарной станции: 1 – полевые диафрагмы; 2 – кюветы спектральной селекции с ФЭУ; 3 – фокон; 4 – световод; 5 – механический обтюратор; Nd:YAG – твердотельный лазер; XeCl – эксимерный лазер; Cu – лазер на парах меди; H₂ – ячейка ВКР преобразования с водородом; К – коллиматор; УД – усилители-дискриминаторы; ВБП – высоковольтные блоки питания; БВФ – блок включения фотоприемника; ШД – шаговые двигатели

Технические характеристики лидарного комплекса

Параметры лидара	Измеряемые характеристики							
	аэрозоль					температура	озон	влажность
<i>Передатчик</i>								
Длина волны зондирования λ, нм	511	532	628	683	1064	532	308 353	308
Энергия импульса, мДж (соотв. λ)	1	150	1	60	250	150	100 50	150
Частота следования, Гц (соотв. λ)	2500	20	2500	20	20	20	50–200	100
Расходимость, мрад	0,1					0,1	0,1–0,3	0,1–0,3

Параметры лидара	Измеряемые характеристики										
	аэрозоль					температура		озон		влажность	
<i>Приемник</i>											
Метод зондирования	Обратное упругое рассеяние						КР от N ₂	Дифференциальное поглощение и рассеяние	КР от		
									H ₂ O	N ₂	
Длина волны, нм	511	532	628	683	1064	532	607	308	353	347	332
Диаметр зеркала, м	2,2	0,3	2,2	0,3	2,2	2,2	2,2	0,5		0,5	
Фокусное расстояние, м	10	1	10	1	10	10	10	1,5		1,5	
<i>Интерференционные фильтры</i>											
Максимальное пропускание T, %	65	62	75	68	60	62	70	56 60		59	44
Ширина пропускания по уровню 0,5T, нм	1,8	2			3,9	2	1,8	4,5 6		1,7	3

1.1. Лидарная система для измерений характеристик стратосферного аэрозольного слоя и температуры средней атмосферы

Базовым лазером системы (см. рис. 1,а) является Nd:YAG-лазер – модель LQ514 минской фирмы «SOLAR LS», работающий на длине волны второй гармоники 532 нм с частотой следования импульсов генерации 20 Гц при энергии импульсов 150 мДж. Имеется также возможность зондирования на длине волны основного излучения 1064 нм или же на указанных двух длинах волн одновременно. Из данных одночастотного зондирования восстанавливаются оптические характеристики САС: высотные профили коэффициента обратного аэрозольного рассеяния и отношения рассеяния, интегральный коэффициент обратного аэрозольного рассеяния.

Регулярные измерения оптических характеристик САС ведутся нами, как и на большинстве лидарных обсерваторий мировой сети, на длине волны зондирования 532 нм, что позволяет проводить сравнительный анализ данных для различных географических точек наблюдений. Качественный анализ спектра размеров частиц по параметру Ангстрема возможен из данных двухчастотного зондирования, для чего используются пары длин волн 532/1064 или 532/683 нм.

Для определения спектра размеров аэрозольных частиц эпизодически осуществляется многочастотное зондирование на различных комбинациях длин волн – 1064, 532, 683, 511 и 628 нм, где 683 нм – длина волны 1-й стоксовой компоненты ВКР преобразованной частоты линии 532 нм в водороде, 511 и 628 нм – длины волн генерации лазеров на парах меди и золота соответственно. По сравнению с высокоэнергетичным Nd:YAG-лазером лазеры на парах металлов имеют меньшую энергию импульсов излучения (~1 мДж), что устраняет эффект насыщения ФЭУ и искажение лидарного сигнала мощным сигналом из ближней зоны зондирования. Необходимое превышение уровня полезного сигнала над фоновым достигается за счет высокой частоты следования (2,5 кГц). Расходимость вы-

ходного излучения Nd:YAG-лазера уменьшается 10-кратным линзовым телескопом до 0,1 мрад. Лазеры на парах меди и золота не требуют дополнительной коллимации выходного излучения, так как снабжены неустойчивыми резонаторами, которые обеспечивают расходимость 0,1–0,2 мрад.

Многоканальный режим работы лидара с приемным зеркалом диаметром 2,2 м осуществляется за счет наклона некоторых зондирующих лазерных лучей на небольшой угол $\gamma \sim 30'$ относительно вертикали (рис. 1,а для $\lambda = 511$ нм). При этом в фокальной плоскости приемного зеркала положение фокуса для наклонных лучей смещается от центрального фокуса на расстояние –9 см. Для регистрации лидарных сигналов в фокальной плоскости приемного зеркала смонтирована специальная шайба, в которой кроме центрального отверстия имеются дополнительные, расположенные по концентричной с центральным фокусом окружности радиусом 9 см.

Для снижения уровня фоновых засветок поле зрения приемных систем до определенных пределов ограничивается полевыми диафрагмами, совмещенными с изображением зондирующего луча в фокальной плоскости. Пройдя диафрагмы, оптический лазерный сигнал поступает на кюветы спектральной селекции, включающие: коллимирующие линзы, спектроделительные зеркала, интерференционные фильтры и линзы, фокусирующие излучение на ФЭУ. Кюветы селекции и регистрации сигнала монтируются непосредственно в фокальной плоскости приемного зеркала или вне зеркала. В последнем случае передача оптического лидарного сигнала к кюветам осуществляется с помощью фоконов (входной диаметр 10 мм и выходной 1 мм), оптически склеенных со световодами, или жгутов оптических волокон (рис. 1,а). Эффективность светопередачи таких систем достигает 70%.

В качестве приемника оптического излучения видимого диапазона спектра используется ФЭУ-130, работающий в режиме счета импульсов фототока. Для устранения эффекта насыщения ФЭУ мощным сигналом от ближней зоны зондирования и сокращения динамического диапазона принимаемых лидарных сигналов разработано электронное управление коэффициентом усиления ФЭУ [6],

которое позволяет включать ФЭУ в рабочий режим регистрации с определенной регулируемой высотой. Регистрация сигналов на длине волны 1064 нм осуществляется на ФЭУ-83, охлаждаемом элементами Пельтье до температуры примерно $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Преобразованный в фотоимпульсы тока лидарный сигнал с ФЭУ поступает на широкополосный усилитель и дифференциальный амплитудный дискриминатор. Дискриминатор позволяет регулировать нижний и верхний пороги дискриминации темновых импульсов конкретного образца ФЭУ в условиях реальной фоновой засветки, т.е. выбирать оптимальные пороги дискриминации для повышения отношения сигнал-шум. Сформированные в дискриминаторе импульсы поступают на счетчики фотонов, запускаемые синхронно с лазерным импульсом. Используются одно- или двухканальные счетчики с накоплением импульсов в 512 или 1024 строках длиной по 100 м каждый, т.е. обеспечивается регистрация сигналов до высот 50 или 100 км с пространственным разрешением 100 м.

При зондировании характеристик САС на длинах волн 532 и 683 нм регистрация оптических лидарных сигналов осуществляется приемным зеркалом диаметром 0,3 м. Достаточное отношение сигнал-шум сохраняется в этом случае до высот более 30 км. Приемный телескоп на основе главного зеркала диаметром 2,2 м позволяет регистрировать сигналы обратного упругого рассеяния на длине волны 532 нм до высот более 70 км (рис. 2).

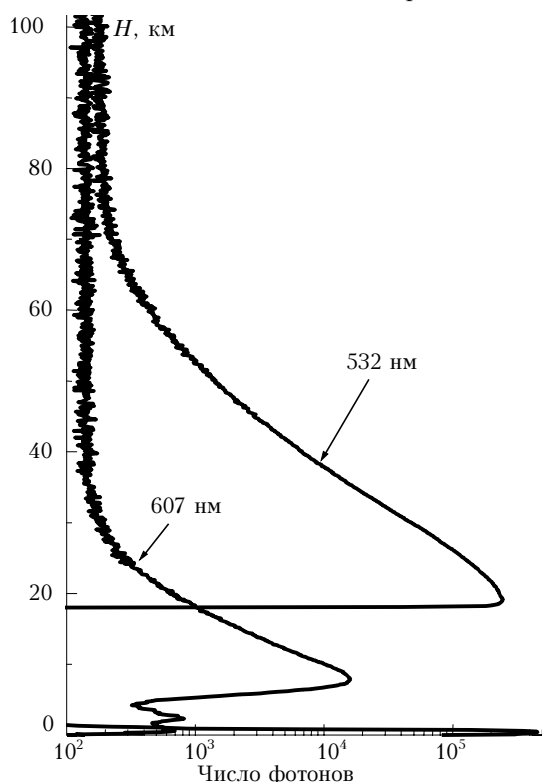


Рис. 2. Лидарные сигналы обратного упругого (532 нм) и комбинационного (607 нм) рассеяния, зарегистрированные 18 марта 2004 г. приемным зеркалом диаметром 2,2 м. Для сигнала на линии 532 нм включено электронное записание ФЭУ до 18 км

Выше 30 км, где аэрозоль практически отсутствует (по крайней мере, в фоновых условиях длительного отсутствия мощных вулканических извержений), интенсивность лидарного сигнала определяется чисто молекулярным рассеянием, что позволяет восстанавливать из этих сигналов молекулярную плотность и температуру средней атмосферы, поскольку плотность линейно зависит от температуры. При этом меняющееся во времени вертикальное распределение плотности (температуры) позволяет исследовать волновые процессы, так называемые внутренние гравитационные волны (ВГВ). Регистрация слабых КР-сигналов от азота на длине волны 607 нм также осуществляется приемным зеркалом диаметром 2,2 м. Сигнал регистрируется до высот ~ 30 км (см. рис. 2).

Главное достоинство КР-лидара в том, что сигнал в этом случае не имеет прямого вклада от аэрозольного рассеяния, т.е. число регистрируемых рассеянных фотонов прямо пропорционально молекулярной плотности атмосферы, что позволяет восстанавливать профиль вертикального распределения температуры. Таким образом, одновременное определение температуры по сигналам молекулярного упругого рассеяния (532 нм) и КР-сигналам (607 нм) дает возможность получать профиль температуры во всей стратосфере и до мезосферных высот.

Разработанный аэрозольный лидарный комплекс используется также для зондирования облачности в дневное и ночное время, в том числе облаков верхнего яруса сквозь нижележащую облачность [5]. В этом случае используется коаксиальная схема лидарного приемопередатчика. Регистрация в режиме счета фотонов позволяет исследовать динамику оптических и геометрических характеристик облачности с временным разрешением 3–4 с. Дневные измерения осуществляются на длине волны 1064 нм, при ночных измерениях используется высокочастотный (2,5 кГц) лазер на парах меди (511 нм). Большая частота следования импульсов этого лазера в условиях малых фоновых засветок ночного неба обеспечивает информативный уровень лидарного сигнала с усреднением по 1000 выстрелов. При этом временное разрешение измерений составляет 1 с.

Для климатологических исследований характеристик САС над различными географическими районами разработан мобильный вариант лидара на основе Nd:YAG-лазера и приемного зеркала диаметром 0,3 м. Лидар имеет компактную блочную конструкцию и может доставляться любым видом транспорта к месту измерений. Лидар показал надежность в работе при его эксплуатации на борту теплохода по р. Иртыш в районе г. Омска в 2001 г. и в стационарных условиях во время экспедиционных измерений 2001–2003 гг. в районах гг. Омск, Surgut, Норильск и оз. Байкал. Результаты лидарных исследований характеристик фонового стратосферного аэрозоля над различными регионами Сибири опубликованы в работе [7].

1.2. Лидар для измерений вертикального распределения стратосферного озона и влажности в тропосфере

Лидарные измерения вертикального распределения концентрации озона в стратосфере осуществляются на основе метода дифференциального поглощения рассеянной назад энергии на длинах волн $\lambda_{on} = 308$ и $\lambda_{off} = 353$ нм, где 308 нм – длина волны, соответствующая основной частоте излучения эксимерного XeCl-лазера (модель LPX 120i «Lambda Physik»), 353 нм – ее первая стоксова компонента ВКР преобразования в водороде. Лидарные сигналы регистрируются приемным зеркалом диаметром 0,5 м (см. рис. 1,б) на ФЭУ R7207-01 с усилителями-дискриминаторами С3866 фирмы «HAMAMATSU», которые имеют лучшие квантовую эффективность и быстродействие по сравнению с ФЭУ-130. Для отсечки интенсивного сигнала от ближней зоны зондирования используется механический обтюратор. Энергетический потенциал лидара позволяет восстанавливать профили концентрации озона в высотном диапазоне 14–40 км.

В спектре сигналов обратного рассеяния, возбуждаемых лазерным импульсом на длине волны 308 нм, присутствуют сигналы КР от молекул воды (347 нм) и азота (332 нм). Эти сигналы регистрируются в коаксиальной схеме лидарного приемопередатчика при замене спектральной оптики (спектроделитель и интерференционные фильтры) 308/353 нм на 347/332 нм. Для подавления искажения КР-сигналов крылом линии обратного рэлеевского рассеяния на длине волны зондирования 308 нм применяется дополнительный фильтр на основе поглощающей кюветы с ацетоном толщиной 10 мм, который поглощает излучение на 308 нм, пропуская 332 и 347 нм. По отношению лидарных сигналов КР от воды и азота определяется профиль вертикального распределения водяного пара в тропосфере как отношение смеси [4].

2. Автоматизация управления работой системы фотоэлектронной регистрации и оптико-механических узлов лидара

Напряжение питания ФЭУ, уровни порогов дискриминации, высота включения ФЭУ в рабочий режим регистрации устанавливаются с клавиатуры компьютера оператора. Устройство установки и регулировки значений перечисленных параметров связано с компьютером посредством трехканального выходного аналогового порта, выполненного в виде отдельной платы в стандарте IBM PC. Структурная схема аналогового порта представлена на рис. 3.

Выходной аналоговый порт состоит из адресного селектора, который по соответствующему адресу выбирает один из трех каналов данных и передает на блок цифроаналоговых преобразователей (ЦАП). Блок ЦАП формирует необходимые уровни

напряжения, которые передаются по кабелю к управляемым блокам лидара.

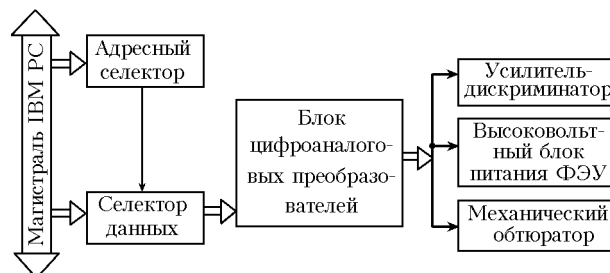


Рис. 3. Структурная схема трехканального выходного аналогового порта

Процесс юстировки оптических осей лидарного приемопередатчика на параллельность, т.е. обеспечение регистрации лидарных сигналов с максимальной высотой зондирования, осуществляется с помощью автоматизированного оптико-механического юстировочного узла (см. на рис. 1), который выполнен на основе шаговых двигателей ДШИ 200-1. Структурная схема автоматизированного юстировочного узла представлена на рис. 4.

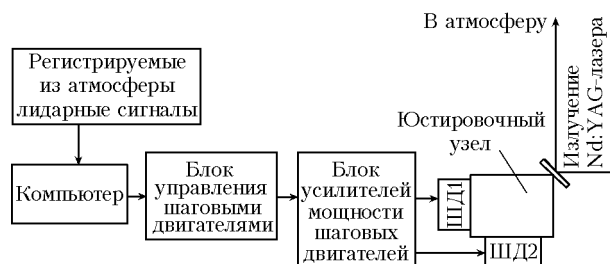


Рис. 4. Структурная схема автоматизированного юстировочного узла

Управление работой шаговых двигателей осуществляется блоком управления, выполненным в виде отдельной платы в стандарте IBM PC. Блок управления формирует тактовые импульсы и уровни напряжения, определяющие направление вращения валов двигателей. После этого они передаются по кабелю на блок усилителей мощности. Чтобы устранить влияние наводок на работу двигателей, блок управления работает на нагрузку 50 Ом.

Блок усилителей мощности шаговых двигателей осуществляет формирование и усиление управляющих импульсов, которые поступают на обмотки шаговых двигателей. Валы шаговых двигателей соединены с юстировочными винтами узла посредством зубчатых колес. Работа блока управления осуществляется программным модулем, который встроен в пакет программ по накоплению и предварительной обработке лидарных сигналов. Таким образом, в режиме реального времени можно наблюдать лидарный сигнал на экране компьютера и производить юстировку лидарного приемопередатчика с клавиатуры.

Перед установкой юстировочного узла на лидар были проведены оценки смещения лазерного

луча в зависимости от количества поданных импульсов на шаговые двигатели. Они показали, что за один шаг вращения вала двигателя лазерный луч отклоняется на 0,034 мрад, что соответствует перемещению изображения зондируемого объема в фокальной плоскости приемного зеркала диаметром 0,3 м на расстояние 0,034 мм и на расстояние 0,34 мм для зеркала диаметром 2,2 м. Следовательно, применение автоматизированного юстировочного узла дает возможность проводить тонкую настройку лидара на максимальную высоту зондирования.

Для облегчения настройки лидара разработан программный модуль для автоматической юстировки направленности лазерного излучения на максимальную высоту зондирования. Работа программы осуществляется следующим образом. При запуске программы выполняется первоначальная установка направленности лазерного луча вертикально вверх по счетчику шагов двигателя, которые хранятся в памяти компьютера после первоначальной ручной юстировки. После этого начинается сканирование лазерного луча сначала в одной координате (как в прямом, так и в обратном направлении), а затем в другой, и при этом производится анализ текущей высоты зондирования. Циклы перемещения лазерного луча осуществляются до тех пор, пока не будет достигнута максимальная высота зондирования. По завершению процесса настройки программный модуль выходит в главное меню программы, после чего можно осуществлять накопление лидарных сигналов.

3. Некоторые результаты измерений

Результаты многолетних исследований характеристик стратосферного аэрозольного и озонового слоев, как в фоновых условиях, так и в условиях возмущения стратосферы мощным вулканическим извержением, представлены в работах [2, 7, 13–15]. Здесь приводим только некоторые новые результаты, показывающие информативность многолетних лидарных наблюдений и возможности модернизированного лидарного комплекса для измерений температуры.

Результаты долговременных измерений свидетельствуют о том, что нынешние уровни содержания аэрозолей в стратосфере средних широт после окончания воздействия вулкана Пинатубо (извержение в июне 1991 г.) существенно ниже, чем фоновые уровни в вулканически спокойный период (ВСП) 1989–1990 гг. Так, в летне-осенний период 2000–2004 гг. величина интегрального коэффициента обратного аэрозольного рассеяния в стратосфере понижалась до $5 \cdot 10^{-5} \text{ ср}^{-1}$ против средних значений $(1,5\text{--}2) \cdot 10^{-4} \text{ ср}^{-1}$ в 1989–1990 гг. Поэтому фоновые природные и антропогенные уровни стратосферных аэрозолей могут быть ниже, чем считалось ранее. Долговременные лидарные измерения в Хэмптоне [12] (США: 37° с.ш., 76° з.д.) также показали, что нынешний уровень аэрозольного наполнения стратосферы даже ниже, чем уровень в ВСП 1979 г., который ранее

рассматривался как фоновый уровень аэрозольного содержания стратосферы.

В модернизированном лидарном комплексе определение температуры базируется на следующих физических предпосылках. Коэффициент обратного молекулярного рассеяния (β_{π}^M) прямо пропорционален плотности воздуха (ρ), а плотность воздуха линейно зависит от температуры T (т.е. $\beta_{\pi}^M(H) \sim \rho(H) \sim T(H)$). Эта логическая цепочка реализуется на тех участках трассы зондирования, на которых лидарный сигнал формируется только за счет рассеяния на молекулах воздуха. Данное условие выполняется на высотах выше 30 км, при пренебрежимо малом вкладе в лидарный сигнал рассеяния на аэрозолях по сравнению с рассеянием на молекулах или при его полном отсутствии.

Представленный на рис. 5,а температурный профиль $T(H)$ восстановлен из показанных на рис. 2 лидарных сигналов, накопленных в течение 1 ч 25 мин. Для уменьшения случайной ошибки на дальних участках трассы зондирования лидарные сигналы сглаживались методом скользящего среднего. Применение данной процедуры приводит к закруглению пространственного разрешения (ΔH). Но параметры процедуры выбирались такими, чтобы значение ΔH не превышало 1,5 км.

В диапазоне высот 30–80 км (в условиях отсутствия аэрозоля) для получения $T(H)$ использовались лидарные сигналы $N(H)$ на длине волны $\lambda = 532 \text{ нм}$ и соответствующая методика определения $T(H)$ по сигналам рэлеевского рассеяния [2, 8, 9] с привязкой $N(H)$ к модельному [11] значению температуры на высоте 77 км. Ниже высоты 30 км (в диапазоне высот с ощутимым вкладом аэрозоля) для определения температурного профиля по методике [2, 10] используется сигнал комбинационного рассеяния от молекулярного азота ($\lambda = 607 \text{ нм}$).

На рис. 5,б приведены отклонения (%) профиля $T(H)$ для диапазона высот 30–80 км от кривой, полученной его аппроксимацией полиномом 6-го порядка с использованием метода наименьших квадратов (жирная линия). Отклонения имеют довольно сложную вертикальную структуру, с фрагментами, напоминающими периодические процессы, амплитуда которых увеличивается с ростом высоты. При этом на наиболее крупные периодические вариации отклонений хорошо накладывается синус-функция с пространственным периодом 10 км (тонкая линия на рис. 5,б). Подобные свойства (рост амплитуды и вертикальные масштабы от 10 км и менее) характерны для ВГВ. Эти периодические образования переносят энергию из нижних слоев атмосферы в верхние. При разрушении ВГВ энергия переходит к потоку окружающего воздуха, что может приводить к сильным температурным инверсиям [16], когда плавное уменьшение температуры в мезосфере с ростом высоты довольно часто нарушается появлением резких максимумов. Их протяженность по высоте составляет несколько километров, а амплитуда может достигать 40 К.

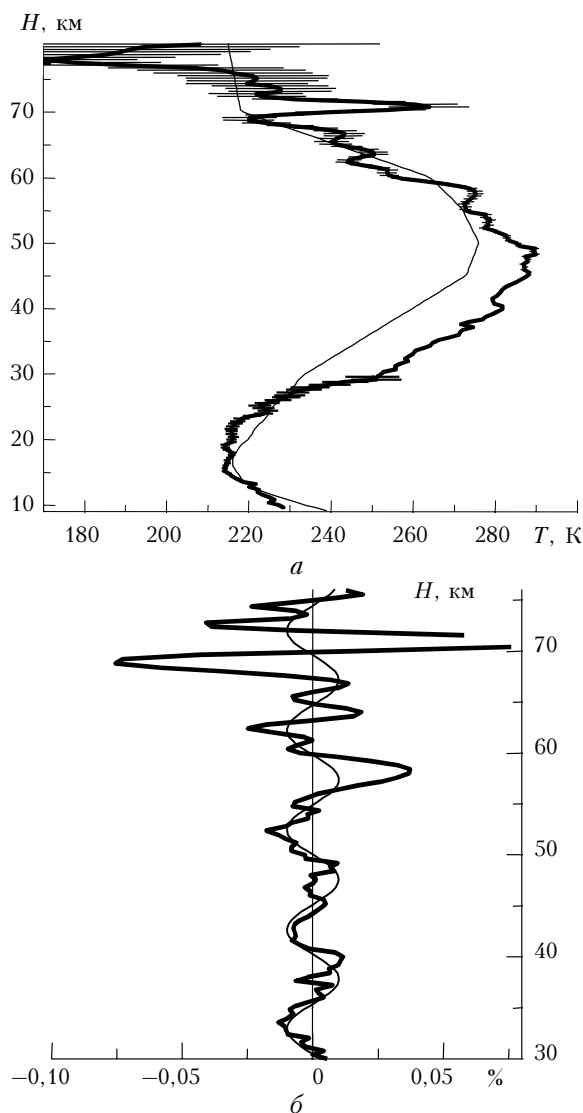


Рис. 5. Вертикальный профиль температуры (жирная линия), восстановленный из данных зондирования 18 марта 2004 г. (см. на рис. 2), модельный [11] профиля температуры (тонкая линия), величина случайной ошибки для соответствующих высотных диапазонов показана горизонтальными линиями (а). Отклонения профиля температуры от его аппроксимации полиномом 6-й степени (жирная линия) и \sin -функция с периодом около 10 км по высоте (тонкая линия) (б)

На рис. 5 резкое увеличение температуры в районе 70 км может быть связано с процессом образования подобной инверсии. Из представленных данных следует, что потенциал лидара позволяет проводить исследования такого важного, влияющего на термодинамические параметры верхней стратосферы динамического фактора, как внутренние гравитационные волны.

Заключение

Модернизация Сибирской лидарной станции позволила измерять вертикальные профили температуры в высотном интервале ~10–75 км по одно-

временно регистрируемыми сигналам обратного упругого молекулярного рассеяния и сигналам комбинационного рассеяния с использованием одного лазерного источника и общего приемного зеркала.

Осуществлена комплексная автоматизация управления работой системы фотоэлектронной регистрации и процессом юстировки лидарного приемопередатчика.

Разработанный лидарный комплекс позволяет осуществлять постоянный контроль за кратковременными и долговременными изменениями характеристик стратосферного аэрозольного и озонового слоев и температуры средней атмосферы. Имеется также возможность измерений характеристик облачности нижнего, среднего, верхнего ярусов и влажности в тропосфере.

Авторы выражают свою признательность доктору физ.-мат. наук А.В. Ельникову за полезные замечания и консультации в ходе выполнения работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минпромнауки РФ на установке «Сибирская лидарная станция» (рег. № 01-64).

1. *Лазерный контроль атмосферы* / Под ред. Э.Д. Хинкли. М.: Мир, 1979. 416 с.
2. Зуев В.В., Ельников А.В., Бурлаков В.Д. Лазерное зондирование средней атмосферы. Томск: МГП «РАСКО», 2002. 352 с.
3. Зуев В.В. Сибирская лидарная станция – уникальный экспериментальный комплекс для дистанционных исследований атмосферы // *Оптика атмосф. и океана*. 2000. Т. 13. № 1. С. 94–99.
4. Зуев В.В., Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Невзоров А.В., Орлова Н.Е. Первые результаты лазерного контроля водяного пара в тропосфере на Сибирской лидарной станции // *Оптика атмосф. и океана*. 2003. Т. 16. № 4. С. 374–376.
5. Зуев В.В., Андреев М.И., Бурлаков В.Д., Ельников А.В., Невзоров А.В., Смирнов С.В. Лидарная система для исследований облачности в дневное и ночное время // *Оптика атмосф. и океана*. 1998. Т. 11. № 5. С. 477–479.
6. Правдин В.Л., Зуев В.В., Невзоров А.В. Электронное управление коэффициентом усиления ФЭУ при регистрации лидарных эхосигналов с большим динамическим диапазоном в режиме счета фотонов // *Оптика атмосф. и океана*. 1996. Т. 9. № 12. С. 1612–1614.
7. Зуев В.В., Зуев В.Е., Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Ельников А.В., Невзоров А.В., Правдин В.Л. Лидарные исследования характеристик фонового стратосферного аэрозоля над регионами Сибири // *Оптика атмосф. и океана*. 2003. Т. 16. № 2. С. 126–130.
8. Philbrick C.R., Schmidlin F.E., Grossmann K.U., Lange G., Offermann D., Baker K.D., Krakowsky D., von Zang U. Density and temperature structure over Northern Europe // *J. Atmosf. and Terr. Phys.* 1985. V. 47. N 1–3. P. 159–172.
9. Зуев В.В., Маричев В.Н., Бондаренко С.Л. Исследование точностных характеристик восстановления профилей температуры по лидарным сигналам молекулярного рассеяния // *Оптика атмосф. и океана*. 1996. Т. 9. № 12. С. 1615–1619.
10. Зуев В.В., Маричев В.Н., Бондаренко С.Л., Долгий С.И., Шарбарин Е.В. Предварительные результаты зондирования температуры в тропосфере СКР-лидаром на первом колебательно-вращательном переходе

- молекул азота // Оптика атмосф. и океана. 1996. Т. 9. № 10. С. 1609–1611.
11. *Иттолитов И.И., Комаров В.С., Мицель А.А.* Оптико-метеорологическая модель атмосферы для моделирования лидарных измерений и расчета распространения радиации // Спектроскопические методы зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1985. С. 4–43.
 12. *Woods D.C., Osborn V.T., Lucker P.L.* Lidar monitoring of stratospheric aerosol at Hampton, Virginia. [7 Conference on «Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere» Crete, 24–27 Sept., 2002] // Proc. SPIE. 2002. V. 4882. P. 474–480.
 13. *Zuev V.V., Burlakov V.D., El'nikov A.V., Ivanov A.P., Chaikovskii A.P., Shcherbakov V.N.* Processes of long-term relaxation of SAL in Northern Hemisphere midlatitudes after a powerful volcanic eruption // Atmos. Environ. 2001. V. 35. P. 5059–5066.
 14. *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.
 15. *Зуев В.В., Долгий С.И., Баженов О.Е.* Климатология и тренды стратосферного озона над Томском за период 1996–2002 гг. // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17. № 4. С. 312–316.
 16. *Hauchecorne A., Maillard A.* A 2-D dynamical model of mesospheric temperature inversions in winter // Geophys. Res. Lett. 1990. V. 17. P. 2197–2200.

V.D. Burlakov, S.I. Dolgii, A.V. Nevozorov. **Modification of the measurer complex of Siberian lidar station.**

We consider a modernized measurement complex of Siberian Lidar Station for monitoring of short- and long-term variations of characteristics of stratospheric aerosol layer (SAL), ozonosphere, and temperature of the middle atmosphere. The measurements of the SAL characteristics are performed at sensing wavelength of 532 nm using a receiving mirror 0.3 m in diameter. The receiving mirror with diameter of 2.2 m allows us to record molecular backscattering signals in the altitude range of 30–80 km and, simultaneously, the signals of Raman scattering from nitrogen molecules at wavelength of 607 nm in altitude range 10–30 km. The simultaneous signal recording makes it possible to reconstruct the continuous temperature profile for the altitude range –(10–75) km. The measurements of vertical ozone distribution in the stratosphere use the method of differential absorption and scattering at wavelength pair 308/353 nm, where lidar signals are recorded with a receiving mirror 0.5 m in diameter.