

Лидарный комплекс малой станции высотного зондирования атмосферы ИОА СО РАН

В.Н. Маричев, Д.А. Бочковский*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 3.04.2019 г.

Описан лидарный комплекс малой станции высотного зондирования атмосферы Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН (МСВЗА). Лидар создан на основе телескопа системы Ньютона с зеркалом диаметром 1 м и предназначен для мониторинга вертикальной стратификации аэрозоля и распределения температуры и плотности воздуха в средней атмосфере. Приведены его блок-схема и технические характеристики. Дано описание как аппаратной части, так и программных систем управления, регистрации и обработки результатов измерений. Для иллюстрации работы лидара и демонстрации его возможностей приведены профили вертикального распределения аэрозоля, температуры и плотности воздуха в диапазоне высот 10–70 км.

Ключевые слова: лидар, средняя атмосферы, обработка данных, температура, аэрозоль, плотность; lidar, average atmosphere, data processing, temperature, aerosol, density.

Введение

В формировании климата планеты важную роль играет атмосфера, ее оптически активные аэрозольные и газовые компоненты. Прогноз климатических изменений возможен лишь с помощью многопараметрических теоретических моделей, для создания которых требуются в том числе данные о пространственно-временном распределении аэрозольных и газовых составляющих, а также термодинамических характеристик атмосферы [1, 2]. Для получения такой информации необходимы регулярные измерения и анализ параметров атмосферы, характеризующих ее состояние и свойства.

В настоящее время в исследованиях окружающей среды широко применяются лидарные технологии, которые берут свое начало с момента появления первых лазеров. Основное преимущество лидарных технологий состоит в том, что они позволяют получать информацию об объекте исследования на расстоянии за счет различных эффектов взаимодействия излучения с веществом. За более чем пятидесятилетнюю историю развития лидарных методов была создана солидная методическая и технологическая основа для дистанционного зондирования атмосферы. Эти технологии позволяют дистанционно определять такие параметры атмосферы, как температура, плотность, влажность, скорость ветра, газовый состав, концентрация аэрозолей, распределение аэрозольных частиц по размерам и пр. Практическая реализация методов требует примене-

ния новейших достижений в области оптики, механики, электроники, лазерной техники, информатики. Именно в этих областях знания в последнее время идет бурное развитие, обеспечивая перспективные условия для создания уникальных лидарных систем.

Преимущества лидарных технологий в полной мере проявляются в тех случаях, когда непосредственное получение информации об объекте исследования с помощью традиционных методов невозможно или затруднено, например, когда необходимо исследовать атмосферу на высотах > 40 км, куда уже не долетают радиозонды, а применение метеорологических ракет слишком дорого.

К преимуществам лидарного зондирования также необходимо отнести высокое пространственно-временное разрешение получаемых данных, возможность проведения длительных непрерывных наблюдений, оценку выбранной характеристики в произвольном направлении лазерного луча, на различных высотах и т.д. Однако среди известных лидарных технологий нет одного универсального метода, которых бы обеспечил изучение сразу и стратосферы, и мезосферы, и термосферы. Только сочетание нескольких методов зондирования дает возможность получения информации во всем необходимом диапазоне высот. Среди них необходимо отметить методы упругого аэрозольного и молекулярного рассеяния света (в иностранной литературе принято называть рассеянием Ми и Рэлея) [3], которые используются в лидарах для определения параметров аэрозоля в нижней и средней атмосфере и температуры в средней атмосфере. Другой метод — спонтанного комбинационного рассеяния света (метод Рамана) —

* Валерий Николаевич Маричев (marichev@iao.ru);
Дмитрий Андреевич Бочковский (moto@iao.ru).

используется в лидарных измерениях температуры до высот порядка 20–30 км [4].

В настоящей работе представлен лидарный комплекс ИОА СО РАН, в котором используются выше-названные методы зондирования, предназначенный для мониторинга вертикальной стратификации аэрозоля и вертикального распределения температуры и плотности воздуха в средней атмосфере. Была проведена модернизация, направленная на расширение функциональных возможностей и повышение точностных характеристик комплекса. В разд. 2 приведены примеры результатов зондирования средней атмосферы.

1. Современное состояние лидарного комплекса: аппаратная часть и программное обеспечение

Лидар со средним энергетическим потенциалом не в состоянии решить задачу зондирования атмосферы до высот 70–100 км. Это под силу только уникальному лидарному комплексу с высоким энергетическим потенциалом. Именно поэтому, с учетом возрастающего интереса к процессам в средней и верхней атмосфере, в последнее время в различных частях света ведутся работы по созданию лидарных комплексов, оснащенных крупногабаритными приемными апертурами и современными мощными лазерными источниками. Такие лидарные системы способны осуществлять мониторинг средней и верхней атмосферы в рутинном режиме.

С учетом указанных требований в ИОА СО РАН был разработан лидарный комплекс на базе приемного зеркала диаметром 1 м [5]. В настоящее время на малой станции высотного зондирования атмосферы (МСВЗА) в мониторинговом режиме проводятся наблюдения за температурой, плотностью воздуха и стратификацией аэрозоля в средней атмосфере. Благодаря использованию в совокупности методов упругого аэрозольного, молекулярного и спонтанного комбинационного рассеяния света комплекс можно назвать аэрозольно-рэлеевским-рамановским лидаром, его блок-схема приведена на рис. 1, а.

Излучателем лидара 1 является лазер LS-2137U-UV3 – специальная модель серийного АИГ: Nd³⁺-лазера LS-2137U с электрооптической модуляцией добротности и преобразованием длины волны излучения основной частоты (1064 нм) генерации в излучение второй гармоники (ВГ) (532 нм) и третьей гармоники (ТГ) (355 нм) с выводом излучения ВГ и ТГ на одну оптическую ось. Основные технические характеристики лазера приведены в табл. 1.

Луч лазера направляется в коллиматор 2, затем коллимированный пучок с расходимостью 0,1 мрад через плоское зеркало 3 выводится вертикально в атмосферу. Обратнорассеянное излучение поступает на телескоп системы Ньютона 4 (табл. 2). В фокальной плоскости телескопа установлена полевая диафрагма 6 для формирования поля зрения приемной антенны, выполняющая в конечном счете пространственную селекцию сигналов.

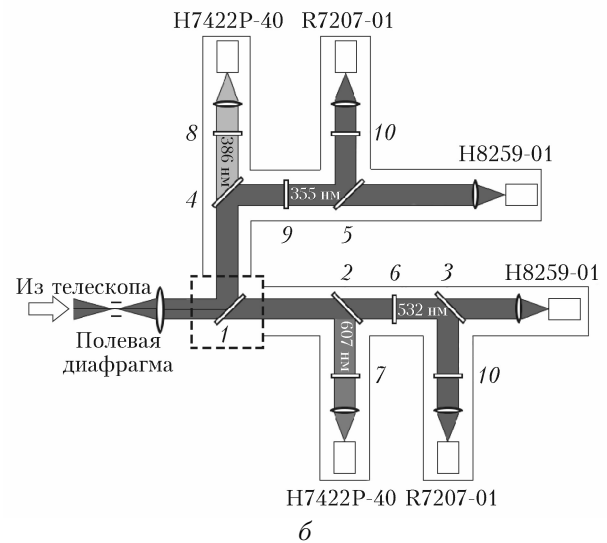
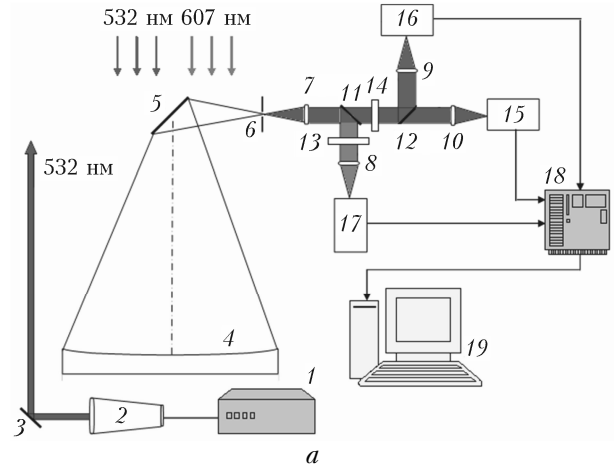


Рис. 1. Структурная схема лидара (а): 1 – лазер, 2 – коллиматор, 3 – плоское зеркало, 4 – главное параболическое зеркало, 5 – плоский контротражатель, 6 – диафрагма, 7–10 – фокусирующие линзы, 11 – дихроичная пластина, 12 – светоделительная пластина, 13, 14 – интерференционные светофильтры, 15–17 – фотосенсорные модули, 18 – счетчик фотонов, 19 – компьютер; оптическая блок-схема 6-канального фотоприемного блока лидара (б): 1 – спектроделительная пластина (СПД) Di03-R-442+1, 2 – СПД 532/607, 4 – СПД FF376-Di01, 3, 5 – СПД с соотношением 10 и 90%, 6–9 – интерференционные светофильтры 532; 607; 355; 386 нм, 10 – нейтральные светофильтры; H7422P-40, R7207-01, H8259-01 – фотодетекторы Hamamatsu

Таблица 1

Основные технические характеристики лазера LS-2137U-UV3

Параметр	Значение
Энергия в импульсе, мДж	700
	400
	210
Частота посылки импульса, Гц	10
Длительность импульса на уровне 0,5, нс	≤ 7
Диаметр лазерного пучка, мм	≤ 8
Расходимость выходного излучения, мрад	≤ 0,8
Поляризация	линейная

Таблица 2

Приемная система лидара

Параметр	Значение
Диаметр приемного зеркала, м	1
Фокусное расстояние, м	2
Поле зрения, рад	10^{-3}
Число приемных каналов	3
Принимаемое излучение на длинах волн, нм	355; 532; 607
Полоса пропускания (FWHM), нм;	1;
максимальное пропускание, %	50
Фотодетекторы	R7207-01, H8259-01, H7422P-40 (Hamamatsu)
Квантовая эффективность, %	10–40

Отфильтрованные от фоновых засветок оптические сигналы направляются в приемный блок, в котором производится их спектральная селекция и фотоэлектронное преобразование. В приемном блоке установлены четыре фокусирующие линзы 7–10, дихроичная пластина 11 для разделения излучений на длинах волн $\lambda = 532$ и 607 нм, пластина 12 для разделения излучения на $\lambda = 532$ нм на пучки с примерным соотношением 10 и 90% (уменьшение динамического диапазона при приеме сигналов ближней и дальней зон) и интерференционные светофильтры 13 (532 нм) и 14 (607 нм). Разделенные оптические сигналы по трем отдельным каналам через фокусирующие линзы поступают на фотосенсорные модули 15–17, где происходит их преобразование в электрические сигналы.

В лидаре используются фотоприемные модули фирмы Hamamatsu H2859-01, R7207-01 и H7422P-40, обладающие высокой спектральной чувствительностью и быстродействием [6].

Регистрация одноэлектронных импульсов выполняется счетчиком фотонов 18, разработанным в ИОА СО РАН. Прибор предназначен для приема сигналов с ФЭУ в компьютер 19 под управлением ОС Windows XP и выше. Технические характеристики счетчика фотонов PHCOUNT_8 представлены в табл. 3.

Зондирование проводится в ночное время суток. Используемое вертикальное разрешение измерения сигнала (длина строба) составляет 192 м (при этом минимальный дискрет по стробу равен 12 м). Единичная серия измерений занимала 10 мин, а среднее время проведения измерений за ночь – около 2 ч.

Таблица 3

Основные технические характеристики счетчика фотонов PHCOUNT_8

Параметр	Значение
Число каналов	8
Скорость счета, мГц	до 300
Пространственное разрешение (программно назначаемое), м	3–30
Максимальная дальность трассы, км	160
Число точек на трассу	8000 в каждом канале

Достижимая в измерениях погрешность зависит от числа принятых фотонов с заданной высоты, которое определяется энергией лазерного импульса, длительностью строба, количеством лазерных выстрелов, концентрацией аэрозоля и плотностью воздуха и фоновыми засветками. Относительная погрешность измерений на высотах 15–50 км представлена в табл. 4. Для 30 км в первом столбце приведена погрешность измерений для ближней зоны, во втором – для дальней.

Для перехода к зондированию атмосферы на двух длинах волн был модернизирован трехканальный приемный узел, принимающий сигналы рэлеевского и рамановского рассеяния на $\lambda = 532$ и 607 нм, путем создания трех дополнительных каналов для приема сигналов на $\lambda = 355$ и 386 нм (рис. 1, б) [7]. На входе в фотоприемный блок стоит СДП фирмы Semrock Di03-R-442+1, 25×36 мм толщиной 1,1 мм для разделения двух частей разнородных излучений 532/355 (диаметр пучка 25 мм). Пластина пропускает излучение с $\lambda > 442$ нм и отражает излучение с $\lambda < 442$ нм. На входе в блок, принимающий излучение обратного рассеяния на $\lambda = 355$ нм, стоит СДП FF376-Di01 (фирма Semrock), 25×36 мм толщиной 1,1 мм, которая пропускает излучение с $\lambda > 376$ нм для регистрации сигнала спонтанно-комбинационного рассеяния (СКР) на $\lambda = 386$ нм.

В новом блоке (рис. 1, б) установлены интерференционные светофильтры на $\lambda = 355$ и 386 нм, три линзы CaF₂ (фокусное расстояние – 50 мм, диаметр 25,4 мм), фотосенсорные модули фирмы Hamamatsu и пластина 5 для разделения излучения на $\lambda = 355$ нм на пучки с примерным соотношением 10 и 90% (уменьшение динамического диапазона при приеме сигналов ближней и дальней зон).

Таблица 4

Относительная погрешность измерений стратификации аэрозоля и температуры (для импульса энергией 400 мДж и частоты посылки импульсов 10 Гц)

Параметр	H, км						
	15	20	25	30	40	50	
Отношения рассеяния R	2,8%	3,0%	3,2%	4,8%	3,0%	3,4%	4,6%
Температура (Рэлей*)	0,9%	2%	3,9%	10%	< 1%	1,2%	3,5%
Температура (СКР)	2,4%	5,5%	11%				

* Погрешность приведена для измерений в молекулярной (при отсутствии аэрозоля) стратосфере.

В итоге реализовано четыре приемных канала на длинах волн упругого рассеяния 532 и 355 нм (два канала ближней зоны от 10 до 30 км по высоте плюс два канала дальней зоны от 30 до 70 км по высоте) и два канала рамановского рассеяния на $\lambda = 386$ и 607 нм (высоты верхней тропосферы – нижней стратосферы).

Для лидарного комплекса разработаны и постоянно совершенствуются программные системы удаленного управления аппаратными средствами. В настоящее время разработано и введено в эксплуатацию следующее программное обеспечение.

1. Управление лазером LS-2137U-UV3: позволяет оператору следить за нагревом лазера, изменять режимы запуска лампы накачки, устанавливать режим работы затвора, изменять энергию накачки лампы, выполнять этапы включения и выключения лазера как в ручном, так и в автоматическом режиме.

2. Автоматизированная система юстировки оптических осей приемно-передающего тракта лидара: система в автоматическом режиме обеспечивает и поддерживает точность попадания луча в поле зрения приемной антенны перед и во время сеанса зондирования.

3. Включение и выключение узлов фотоприемного блока.

4. Управление счетчиком фотонов: модуль позволяет регистрировать, накапливать и сохранять лидарные сигналы во время сеанса зондирования атмосферы. Минимальное время накопления сигнала – 1 с. Можно формировать и хранить данные в различных форматах: HDF5, MySQL и текстом. Реализован интерактивный интерфейс пользователя, позволяющий устанавливать начальные настройки счетчика фотонов, запускать и останавливать счетчик фотонов.

Полученные при измерениях исходные данные лидарного зондирования – сигналы обратного рассеяния света – несут информацию о параметрах атмосферы. Для ее получения первичные экспериментальные данные обрабатываются по соответствующим алгоритмам. Для этих целей был разработан программный комплекс, позволяющий восстанавливать вертикальные профили характеристик аэрозоля, температуры и плотности воздуха в средней атмосфере.

Вычислительная система представляет собой набор подключаемых модулей, каждый из которых решает определенную задачу. Благодаря такому способу организации существует возможность разрабатывать и внедрять пользовательские модули, тем самым увеличивая функциональные возможности комплекса. В состав программы входят модули расчета параметров атмосферы по реальным сигналам, модели CIRA86 [8] и данным со спутника Aura [9] и радиозондов [10].

Блок обработки данных содержит набор подключаемых модулей [11], каждый из которых служит для решения конкретной задачи, например для восстановления профиля температуры.

2. Примеры результатов лидарного мониторинга

На МСВЗА более чем за 30 лет были накоплены ряды наблюдений за вертикальной стратификацией аэрозоля, температурой и плотностью воздуха в стратосфере умеренных широт, которые, в силу расположения единственного пункта зондирования в континентальной зоне Сибири, следует отнести к уникальным. За это время были получены важные и интересные результаты: выявлены неустойчивость аэрозольной стратификации весной и ее стабилизация летом, обнаружено образование кратковременных рассеивающих слоев на высотах 22–25 и 30–40 км, коррелирующих по времени с возникновением сильных магнитных бурь [12–14]. За период поствулканического возмущения стратосферы, вызванного сильнейшим извержением вулкана Пинатубо (1991–1995 гг.), отслежена динамика переноса и изменчивости эруптивного аэрозольного облака над Томском, даны интегральные и дифференциальные оценки аэрозольного наполнения стратосферы [15, 16]. На основе результатов анализа рядов наблюдений за 1996–2000 гг. установлено влияние глобальных геофизических процессов на изменчивость вертикальной структуры аэрозоля и температуры атмосферы [17].

Для периода мониторинга 2008–2009 гг. была характерна активная вулканическая деятельность на дальневосточных островах Тихого океана, приводящая к возмущениям аэрозольной компоненты стратосферы. В 2008 г. на гряде Алеутских островов произошло извержение двух вулканов: Окмок (12 июля) и Касаточи (8 августа) с высотой выброса 15 и 13–15 км соответственно. 12 июня 2009 г. произошло самое мощное извержение вулкана Пик Сарычева (о-в Матуа), относящегося к гряде Курильских островов. За неделю наблюдалось 11 гигантских взрывов, при этом столбы пепла поднимались на высоты от 13 до 16 км. Образование в стратосфере аэрозольных слоев от указанных вулканов, их динамика и перенос постоянно регистрировались и отслеживались на МСВЗА над Томском [18]. На рис. 2, а приведены результаты лидарных наблюдений вулканических слоев над Томском.

Полярные стратосферные облака (ПСО), регулярно наблюдаемые в Северной Европе, на территории России обнаруживаются достаточно редко [19, 20]. Тем не менее они неоднократно регистрировались при лидарном зондировании над Томском [21, 22]. На рис. 2, б приведены лидарные наблюдения ПСО в январе 2016 г. на высотах 15–25 км.

Особый интерес в исследованиях термического режима стратосферы представляют температурные аномалии, вызванные зимними стратосферными потеплениями (СП). Последние были открыты Ричардом Шерхагом (Richard Scherhad) еще в 1952 г., но до сих пор не изучены до конца, и их исследования по-прежнему являются актуальными в связи с влиянием СП на динамику и термическую структуру зимней средней атмосферы [23]. Стратосферное

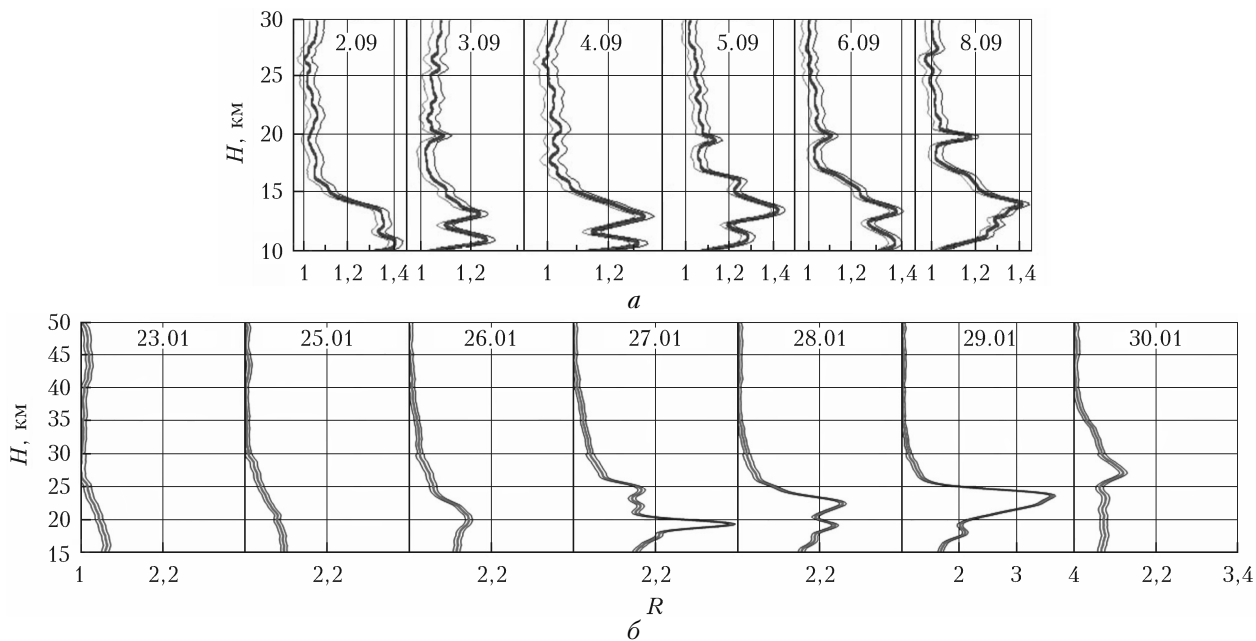


Рис. 2. Аэрозольные слои над Томском: *a* – динамика переноса аэрозольных слоев от извержения вулкана Пик Сарычева в сентябре 2008 г.; *б* – динамика переноса ПСО в январе 2016 г.

потепление – это сильное и внезапное повышение температуры «взрывного характера» в течение нескольких суток [24]. Наиболее интенсивно стратосферные потепления влияют на динамику в полярных областях, а также в средних широтах [25].

Пример проявления стратосферного потепления и вертикальные профили отклонения температуры и плотности воздуха от их среднемесячных модельных значений в декабре 2017 – январе 2018 г. представлены на рис. 3.

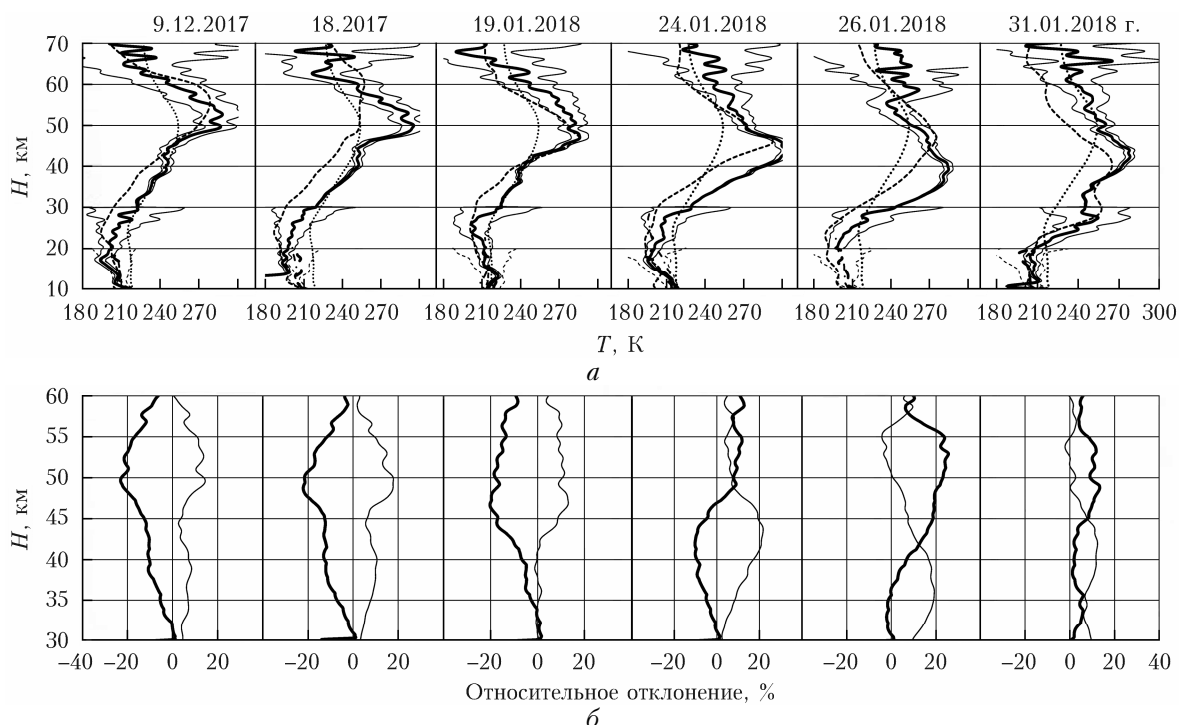


Рис. 3. Лидарные и спутниковые наблюдения стратосферного потепления в декабре 2017 – январе 2018 г. (*a*): лидарные измерения (сплошная полужирная кривая и полужирная штриховая – профили температуры, рассчитанные по рэлеевским и рамановским сигналам; тонкая кривая – стандартное отклонение); измерения со спутника «Аура» и метеозондами (штриховая и штрихпунктирная кривые) и среднемесячный профиль по модели CIRA-86 (точечная кривая). Вертикальные профили отклонения температуры и плотности воздуха по данным лидарных измерений от их среднемесячных модельных значений над Томском в декабре 2017 – январе 2018 г. во время СП (*б*): полужирная кривая – плотность, тонкая кривая – температура

Реализованный переход на двухволновое зондирование позволил получать дополнительную информацию об оценке распределения частиц аэрозоля по размерам. Прежде всего, это относится к определению по двум разнородным сигналам показателя Ангстрема [26], согласно одноименной формуле, спектральной зависимости ослабления излучения аэрозолем:

$$\frac{\tau_{\lambda_1}}{\tau_{\lambda_2}} = \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^{-Z},$$

где τ_{λ_1} , τ_{λ_2} — оптические толщи на длинах волн 355 и 532 нм; Z — показатель Ангстрема. Исследованию связи параметров формулы Ангстрема с аэрозольной оптической толщиной посвящен ряд работ [27–31].

Показатель Ангстрема обратно пропорционален среднему радиусу ансамбля аэрозольных частиц и качественно характеризует изменение распределения частиц по размерам. По данным лидарного зондирования Z можно рассчитать по формуле

$$Z = 4 + 2,48 \left\{ \ln \frac{[R_{\lambda_1} - 1]}{[R_{\lambda_2} - 1]} + n \frac{q_{a\lambda_2}}{q_{a\lambda_1}} \right\},$$

где R — отношение рассеяния; q — лидарное отношение для соответствующих длин волн.

На рис. 4, *a* приведены вертикальные профили отношения рассеяния на двух длинах волн и рассчитанные по ним профили показателя Ангстрема.

По поведению показателя Ангстрема видно изменение микроструктуры аэрозоля по высоте. Так, в рассеивающих слоях (график за 18 декабря

2017 г. — высота 12 км и график за 21 декабря 2017 г. — высоты 20–24 км) сосредоточены частицы аэрозоля с большим средним радиусом, а в интервале высот 14–24 км (графики за 18–19 декабря 2017 г.) наблюдается монотонное уменьшение среднего радиуса аэрозольных частиц с высотой.

Использование коротковолнового излучения ($\lambda = 355$ нм) за счет увеличения рэлеевского рассеяния в $(532/355)^4 \approx 5$ раз позволит уменьшить вклад аэрозольной компоненты в суммарный лидарный сигнал упругого рассеяния. Последний при расчете температуры по лидарным сигналам, полученным в присутствии аэрозольной компоненты, приводит к занижению ее значений по сравнению с реальными. На рис. 4, *б* для дат наблюдений с сильным и слабым аэрозольным слоем (18 и 19 декабря 2017 г.) просматривается отклонение температурных профилей, рассчитанных по сигналам на $\lambda = 355$ и 532 нм, в левую сторону от измеренных радиозондом, причем в большей степени — для рассчитанного по сигналам на $\lambda = 532$ нм. Из рисунка также видно, что профиль температуры, измеренный по рамановским сигналам, близок к контрольным радиозондовым измерениям, т.е. влияние аэрозольной компоненты устраняется.

При одновременном приеме сигналов упругого аэрозольно-рэлеевского и рамановского рассеяния света удастся корректно выделить аэрозольную компоненту за счет нормировки суммарного сигнала упругого рассеяния на комбинационное, т.е. реальное молекулярное рассеяние, по сравнению с нормировкой на молекулярное модельное, что показано на рис. 4, *в*.

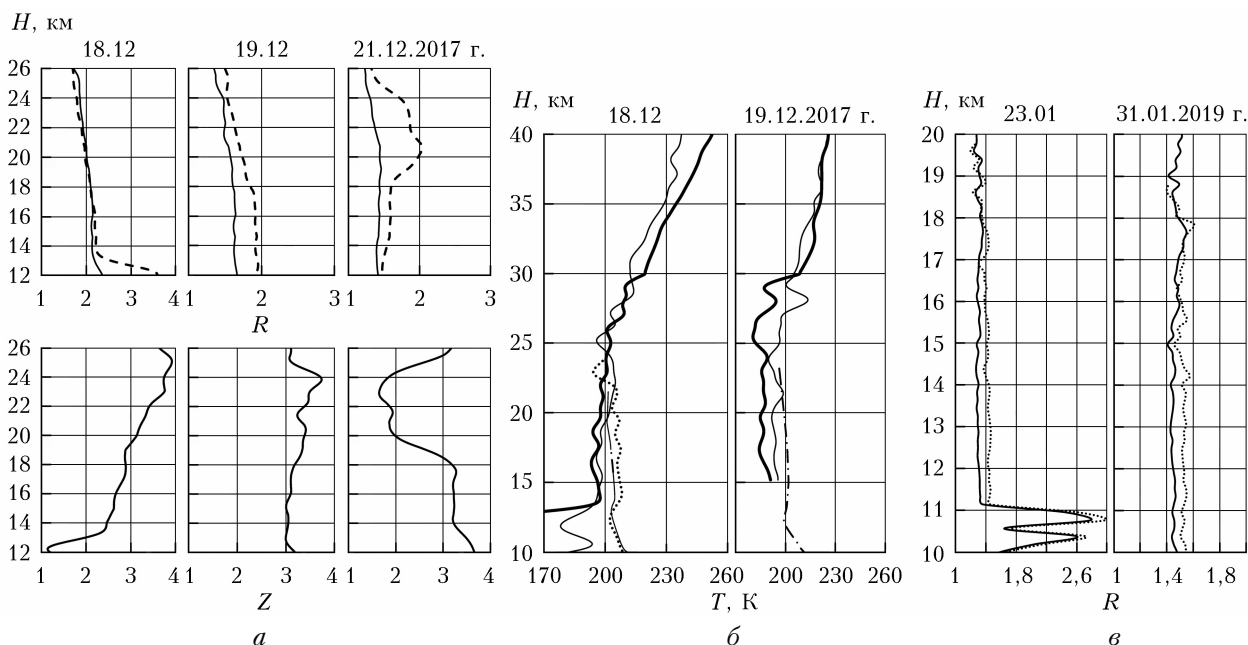


Рис. 4. Профили: *a* — отношения рассеяния $R(H)$ на $\lambda = 355$ и 532 нм (сплошная и штриховая кривые) и показателя Ангстрема $Z(H)$; *б* — температуры, рассчитанные по сигналам упругого (на $\lambda = 355$ и 532 нм, сплошные тонкая и полужирная кривые) и рамановского (на $\lambda = 607$ нм, точечная кривая) рассеяния в сравнении с радиозондовыми измерениями (штрихпунктирная кривая); *в* — отношения рассеяния, полученные при нормировке на модельное молекулярное рассеяние (сплошная кривая) и на рамановское рассеяние (точечная кривая)

Заключение

Многофункциональный лидарный комплекс ИОА СО РАН на базе приемного телескопа с главным зеркалом диаметром 1 м позволяет оперативно и регулярно получать профили аэрозольной стратификации, температуры и плотности атмосферы в интервале высот 10–70 км с пространственным разрешением 192 м на $\lambda = 532$ нм. Модернизация фотоприемного узла с переходом на двухволновое зондирование (532 + 355 нм) позволяет принимать лидарные сигналы аэрозольно-рэлеевского и рамановского рассеяния света на $\lambda = 532, 607$ и 355, 386 нм соответственно.

Двухволновое зондирование дает возможность получать дополнительную информацию о распределении частиц аэрозоля по размерам. Прежде всего, это относится к определению по двум разноволновым сигналам показателя Ангстрема, величина которого обратно пропорциональна среднему радиусу ансамбля рассеивающих аэрозольных частиц. Появилась возможность качественно отслеживать изменение микроструктуры аэрозоля по трассе зондирования.

Ввод приемных рамановских каналов позволил расширить диапазон измерения температуры с продвижением в тропосферу до 7 км за счет устранения влияния аэрозольной компоненты. Кроме того, при нормировке сигнала суммарного упругого рассеяния на сигнал рамановского рассеяния корректно выделяется аэрозольная компонента. Ранее при отсутствии сигналов рамановского рассеяния последняя выделялась по модельному молекулярному рассеянию, что приводило к некоторой неопределенности за счет расхождения модели с реальными условиями.

Авторы благодарят Г.Г. Матвиенко за обсуждение статьи и сделанные им конструктивные замечания, которые, несомненно, помогли улучшить ее качество.

Работа выполнена при финансовой поддержке базового проекта № АААА-А17-117021310145-6, при частичной поддержке гранта РФФИ № 19-45-700008.

1. Кондратьев К.Я. Спутниковая климатология. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 264 с.
2. Захаров В.А., Костко О.К., Хмелевцов С.С. Лидары и исследования климата. Л.: Гидрометеиздат, 1996. 320 с.
3. Зуев В.В., Ельников А.В., Бурлаков В.Д. Лазерное зондирование средней атмосферы. Томск: Раско, 2002. 352 с.
4. Hinkley E.D. Laser Monitoring of the Atmosphere. Вe-Heidelberg; New York: Springer, 1976. 380 p.
5. Ельников А.В., Марицев В.Н., Шелевой К.Д., Шелефонток Д.И. Лазерный локатор для исследования вертикальной стратификации аэрозоля // Оптика атмосфер. и океана. 1988. Т. 1, № 4. С. 117–123.
6. Marichev V.N., Bochkovskii D.A. Modernization of the small lidar station of IAO SB RAS // Proc. SPIE. 2015. V. 9680. DOI: 10.1117/12.2205770.
7. Marichev V.N., Bochkovskii D.A. A regular stage of modernization of the lidar complex of a small lidar station at IAO SB RAS // Proc. SPIE. V. 10833. DOI: 10.1117/12.2504370.
8. Rees D., Barnett J.J., Labitske K. COSPAR International Reference Atmosphere: 1986. Part II, Middle Atmosphere Models // Adv. Space Res. 1990. V. 10, N 12. 525 p.
9. URL: <http://mirador.gsfc.nasa.gov> (last access: 3.03.2018).
10. URL: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> (last access: 3.03.2018).
11. Marichev V.N., Bochkovskii D.A. Software complex for processing the lidar data obtained at small lidar station of IAO SB RAS // Proc. SPIE. 2016. V. 10035. DOI: 10.1117/12.2249045.
12. Ельников А.В., Зуев В.В., Марицев В.Н. Результаты лазерного зондирования вертикальной стратификации аэрозоля над Западной Сибирью (1986–1989 гг.) // Оптика атмосфер. и океана. 1991. Т. 4, № 6. С. 631–637.
13. Ельников А.В., Зуев В.В., Токсова Т.С., Марицев В.Н. Особенности корреляционных связей стратосферного аэрозоля // Оптика атмосфер. и океана. 1992. Т. 5, № 2. С. 193–197.
14. Марицев В.Н., Богданов В.В., Живетьев И.В., Шевцов Б.М. Влияние геомагнитных возмущений на образование аэрозольных слоев в стратосфере // Геомагнетизм и аэрномия. 2004. № 6. С. 1–8.
15. Бурлаков В.Д., Ельников А.В., Зуев В.В., Марицев В.Н., Правдин В.Л., Смирнов С.В., Столярова Н.А. Результаты лидарных наблюдений аэрозоля и озона стратосферы после извержения вулкана Пинатубо // Оптика атмосфер. и океана. 1993. Т. 6, № 10. С. 1224–1233.
16. Бурлаков В.Д., Ельников А.В., Зуев В.В., Марицев В.Н., Правдин В.Л. Следы извержения вулкана Пинатубо в стратосфере над Западной Сибирью (Томск, 56° с.ш.) // Оптика атмосфер. и океана. 1992. Т. 5, № 6. С. 602–604.
17. Крученицкий Г.М., Марицев В.Н. Влияние глобальных геофизических процессов на изменчивость вертикального распределения озона, температуры и аэрозоля над Западной Сибирью // Оптика атмосфер. и океана. 2008. Т. 21, № 4. С. 294–298.
18. Марицев В.Н., Самохвалов И.В. Лидарные наблюдения аэрозольных вулканических слоев в стратосфере Западной Сибири в 2008–2010 гг. // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 3. С. 224–231.
19. Ельников А.В., Зуев В.В., Бурлаков В.Д. О типе полярных стратосферных облаков наблюдаемых в январе 1995 г. над Томском // Современные достижения в исследованиях окружающей среды и экологии. Сб. науч. статей, посвящ. памяти акад. В.Е. Зуева. Томск: STT, 2004. С. 29–32.
20. Черемисин А.А., Кушнарченко А.В., Марицев В.Н., Николашкин С.В. Метеорологические условия и полярные стратосферные облака над Якутском зимой 2004/05 г. // Метеорол. и гидрол. 2007. № 3. С. 43–53.
21. Черемисин А.А., Марицев В.Н., Новиков П.В. Перенос полярных стратосферных облаков из Арктики к Томску в январе 2010 г. // Оптика атмосфер. и океана. 2013. Т. 26, № 2. С. 93–99; Cheremisin A.A., Marichev V.N., Novikov P.V. Transport of polar stratospheric clouds from the Arctic to Tomsk in January 2010 // Atmos. Ocean. Opt. 2013. V. 26, N 6. P. 492–498.
22. Cheremisin A.A., Marichev V.N., Novikov P.V., Barashkov T.O., Bochkovskiy D.A. Analysis of polar stratospheric cloud observations at Tomsk in January 2016 // Proc. SPIE. 2016. V. 10035. DOI: 10.1117/12.2248748.
23. Barnett J.J., Labitzke K. Planetary waves // Handbook for MAP. 1985. V. 16. P. 138–143.
24. Хромов С.П., Мамонтова Л.И. Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 568 с.

25. *Атмосфера*. Справочник. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 510 с.
26. *Angstrom A.* A study of the radiation of the atmosphere Smithson // *Misc. Coll.* 1918. V. 65. P. 1–159.
27. *Сакерин С.М., Кабанов Д.М.* Мелко- и грубодисперсные компоненты аэрозольной оптической толщи атмосферы в морских и полярных районах // *Оптика атмосфер. и океана.* 2015. Т. 28, № 8. С. 690–697; *Sakerin S.M., Kabanov D.M.* Fine and coarse components of atmospheric aerosol optical depth in maritime and polar regions // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 6. P. 510–517.
28. *Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Полькин В.В., Радионов В.Ф., Holben V.N., Smirnov A.* Вариации оптических и микрофизических характеристик аэрозоля на маршруте Российских антарктических экспедиций в Восточной Атлантике // *Оптика атмосфер. и океана.* 2016. Т. 29, № 8. С. 666–678; *Sakerin S.M., Kabanov D.M.* Fine and coarse components of atmospheric aerosol optical depth in Maritime and Polar Regions // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015, V. 28, N 6. P. 510–517.
29. *Сакерин С.М., Голобокова Л.П., Кабанов Д.М., Полькин В.В., Турчинович Ю.С., Ходжер Т.В., Хуриганова О.И.* Пространственно-временная изменчивость характеристик аэрозоля на маршруте Индо-Атлантической экспедиции НИС «Академик Николай Страхов» // *Оптика атмосфер. и океана.* 2017. Т. 30, № 1. С. 42–52; *Sakerin S.M., Golobokova L.P., Kabanov D.M., Pol'kin V.V., Turchinovich Yu.S., Khodzher T.V., Khuriganova O.I.* Spatiotemporal variations in aerosol characteristics along the route of the Indian-Atlantic expedition onboard the Research Vessel Akademik Nikolaj Strakhov // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 4. P. 349–359.
30. *Сакерин С.М., Кабанов Д.М.* Пространственно-временная изменчивость аэрозольной оптической толщи атмосферы на маршруте 42-го рейса НИС «Академик Борис Петров» // *Оптика атмосферы и океана.* 2018. Т. 31, № 1. С. 11–16; *Sakerin S.M., Kabanov D.M.* Spatiotemporal variations in atmospheric aerosol optical depth along the route of the 42nd cruise of RV “Akademik Boris Petrov” // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 3. P. 250–256.
31. *Кабанов Д.М., Сакерин С.М., Турчинович Ю.С.* Межгодовая и сезонная изменчивость аэрозольной оптической толщи атмосферы в районе г. Томска (1995–2018 гг.) // *Оптика атмосфер. и океана.* 2019. Т. 32, № 7. С. 548–555; *Kabanov D.M., Sakerin S.M., Turchinovich Yu.S.* Interannual and seasonal variations in the atmospheric aerosol optical depth in the Region of Tomsk (1995–2018) // *Atmos. Ocean. Opt.* 2019. V. 32, N 6. P. 663–670.

V.N. Marichev, D.A. Bochkosvky. **Lidar complex of a small station of high-altitude atmosphere sounding of IAO SB RAS.**

The lidar complex of a small station of high-altitude atmospheric sounding of V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS is described. The lidar is based on a Newton telescope with a 1-m mirror and is designed to monitor the vertical stratification of aerosol and the distribution of air temperature and density in the middle atmosphere. As an illustration of the lidar operation and demonstration of its capabilities, profiles of the vertical distribution of aerosol, temperature, and density in the altitude range 10–70 km are presented.