

УДК 551.501.5

Лидарные технологии дистанционного зондирования параметров атмосферы

В.Д. Бурлаков¹, С.И. Долгий¹, А.П. Макеев¹, Г.Г. Матвиенко¹,
А.В. Невзоров¹, А.Н. Солдатов², О.А. Романовский^{1,2},
О.В. Харченко¹, С.В. Яковлев^{1,2*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 28.03.2013 г.

Рассмотрены характеристики модернизированного измерительного комплекса Сибирская лидарная станция, а также некоторые другие лидарные установки, разработанные в Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН в сотрудничестве с Томским государственным университетом, и их возможности для зондирования параметров атмосферы. Представлены результаты лидарных измерений вертикальных профилей температуры в сравнении с данными шаров-зондов и спутниковыми данными. Описан лидар для измерений вертикального распределения озона в верхней тропосфере–стратосфере. Приведены восстановленные профили вертикального распределения озона. Представлены результаты тестовых экспериментов по лазерному зондированию газового состава атмосферы с помощью перспективных для газоанализа ИК-лазеров.

Ключевые слова: лидар, дистанционное зондирование, параметры; lidar, remote sensing, parameters.

Введение

В начале 60-х гг. XX в. (после создания первых лазеров) были осуществлены первые эксперименты по наблюдениям аэрозольного слоя стратосферы оптическим радаром [1]. После этого методы и средства дистанционного лазерного зондирования атмосферы интенсивно развивались вместе с бурным развитием физики и техники лазеров. Большие возможности применения методов лазерного зондирования для мониторинга широкого круга параметров атмосферы обусловлены тем, что при распространении в атмосфере электромагнитного излучения оптического диапазона наблюдается большое число физических процессов взаимодействия излучения с составляющими атмосферы [2]. В настоящее время лидары стали эффективным и широко применяемым средством исследований атмосферы и оперативного контроля за ее состоянием. По данным Международной координационной группы по лазерным исследованиям атмосферы (ICLAS) в мире

насчитывается около 100 лидарных установок, исследования на которых осуществляются в режиме регулярных наблюдений или проведения целенаправленных измерительных кампаний [3].

Для изучения региональных и крупномасштабных пространственно-временных изменений полей атмосферных параметров в настоящее время широко используются сети лидарных станций, на которых проводятся регулярные координированные измерения методами лазерного зондирования атмосферы. Наземные лидарные сети являются составной частью программы глобальных атмосферных наблюдений Всемирной метеорологической организации (WMO/GAW). На наиболее широко масштабной сети обнаружения стратосферных изменений (NDSC) [4] с помощью лидаров осуществляются, в основном, измерения стратосферного озона, аэрозоля и температуры.

Европейская аэрозольная лидарная сеть (EARLINET) [5] включает 22 лидарные станции для исследований процессов переноса аэрозольных загрязнений природного и антропогенного происхождения в основном в тропосфере над Европой. Процессы переноса аэрозоля в Азии, происхождение которого обусловлено пылью, изучаются лидарными станциями сети AD-Net [6]. В конце 2004 г. на территории Евразийского континента была организована еще одна лидарная сеть – сеть стран СНГ (CIS-LiNet) [7], которая предназначена для изучения процессов переноса аэрозоля и озона.

* Владимир Дмитриевич Бурлаков (burlakov@iao.ru); Сергей Иванович Долгий (dolgii@iao.ru); Андрей Павлович Макеев (mar@iao.ru); Геннадий Григорьевич Матвиенко (mgg@iao.ru); Алексей Викторович Невзоров (nevzorov@iao.ru); Анатолий Николаевич Солдатов (general@tic.tsu.ru); Олег Анатольевич Романовский (goa@iao.ru); Ольга Викторовна Харченко (olya@iao.ru); Семен Владимирович Яковлев (ysv@iao.ru).

Сеть объединяет 6 лидарных станций России, Беларуси и Кыргызстана, в том числе Сибирскую лидарную станцию (СЛС) Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева.

В то же время все новые требования к выходным характеристикам лазерного излучения, необходимым для зондирования самого широкого круга атмосферных параметров, стимулировали поиск новых активных сред с заданными характеристиками генерации, исследования механизмов генерации и разработки все новых лазерных источников для лидарного зондирования атмосферы, создание которых активно ведется в Томском государственном университете и ИОА СО РАН.

В настоящей статье будут рассмотрены технические характеристики измерительного комплекса СЛС, а также некоторые другие лидарные установки, разработанные в Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН в сотрудничестве с Томским государственным университетом, и их возможности для зондирования параметров атмосферы.

1. Измерительный комплекс Сибирской лидарной станции

Многоканальный стационарный лидарный комплекс Сибирской лидарной станции, функционирующий в Томске (56,5° с.ш.; 85,0° в.д.), разработан на основе лазерных источников различного типа, генерирующих в спектральном диапазоне 266–1064 нм, и приемных телескопов на основе зеркал диаметром 2,2; 0,5 и 0,3 м. С использованием различных методов лазерного зондирования комплекс позволяет получать информацию о вертикальном распределении ряда основных радиационно-значимых параметров атмосферы: стратосферно-тропосферный озон и аэрозоль, температура.

В табл. 1 приведены основные технические характеристики лазерных источников и приемных оптических элементов комплекса.

2. Измерения характеристик стратосферного аэрозольного слоя

Наиболее длительные ряды атмосферных наблюдений получены по измерениям характеристик стратосферного аэрозоля (с 1986 г.) и озона (с 1989 г.). Оптические характеристики стратосферного аэрозоля (СА) измеряются в высотном диапазоне 10–30 км на унифицированной для мировой сети лидарных станций длине волны 532 нм. Данные о микроструктурных параметрах СА, которые характеризуют спектр размеров аэрозольных частиц, определяются методом многочастотного зондирования на длинах волн 355, 532 и 683 нм (последняя – первая стоксова компонента преобразования линии 532 нм в ячейке с водородом высокого давления на основе эффекта вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР)).

Указанные длины волн реализуются в одном соосном пучке излучения с использованием одного лазерного источника. Это значительно упрощает процесс настройки и работы трехчастотного лидара, что позволяет вести измерения в режиме регулярных наблюдений. Структурная схема разработанного лидара приведена на рис. 1.

Базовым лазером системы является Nd:YAG-лазер – модель LS-2132T-LBO Минской фирмы «LOTIS ТН», работающий на длинах волн 532 и 355 нм с частотой следования импульсов генерации 20 Гц. Лазерное излучение на длинах волн 355 и 532 нм направляется в ВКР-ячейку. Ячейка изготовлена из трубы (нержавеющая сталь) с внутренним диаметром 3 см и длиной 1 м. Необходимая для получения эффекта ВКР-преобразования плотность энергии накачки обеспечивается линзой, которая устанавливается перед ячейкой и фокусирует излучение накачки на ее центр, после ячейки конфокально устанавливается коллимирующая линза. Фокусные расстояния линз 80 см. Излучение на трех

Таблица 1

Технические характеристики лидарного комплекса										
Параметр	Измеряемая характеристика									
	аэрозоль					температура		озон		
<i>Передатчик</i>										
Длина волны зондирования λ , нм	511	532	355	683	1064	532	308	353	299	341
Энергия импульса, мДж (соответствует λ)	1	70	25	25	200	150	100	50	20	
Частота следования, Гц (соответствует λ)	2500	20	20	20	20	20	50–200		15	
Расходимость, мрад			~0,1			0,1	0,1–0,3		0,1–0,3	
<i>Приемник</i>										
Метод зондирования	обратное упругое рассеяние на аэрозолях и молекулах					молекулярное рассеяние	КР от N ₂	дифференциальное поглощение и рассеяние		
Длина волны зондирования λ , нм	511	532	355	683	1064	532	607	308	353	299 341
Диаметр зеркала, м	2,2	0,3	0,3	0,3	2,2	2,2	2,2 0,3	0,5		0,5
Фокусное расстояние, м	10	1	1	1	10	10	10 1	1,5		1,5

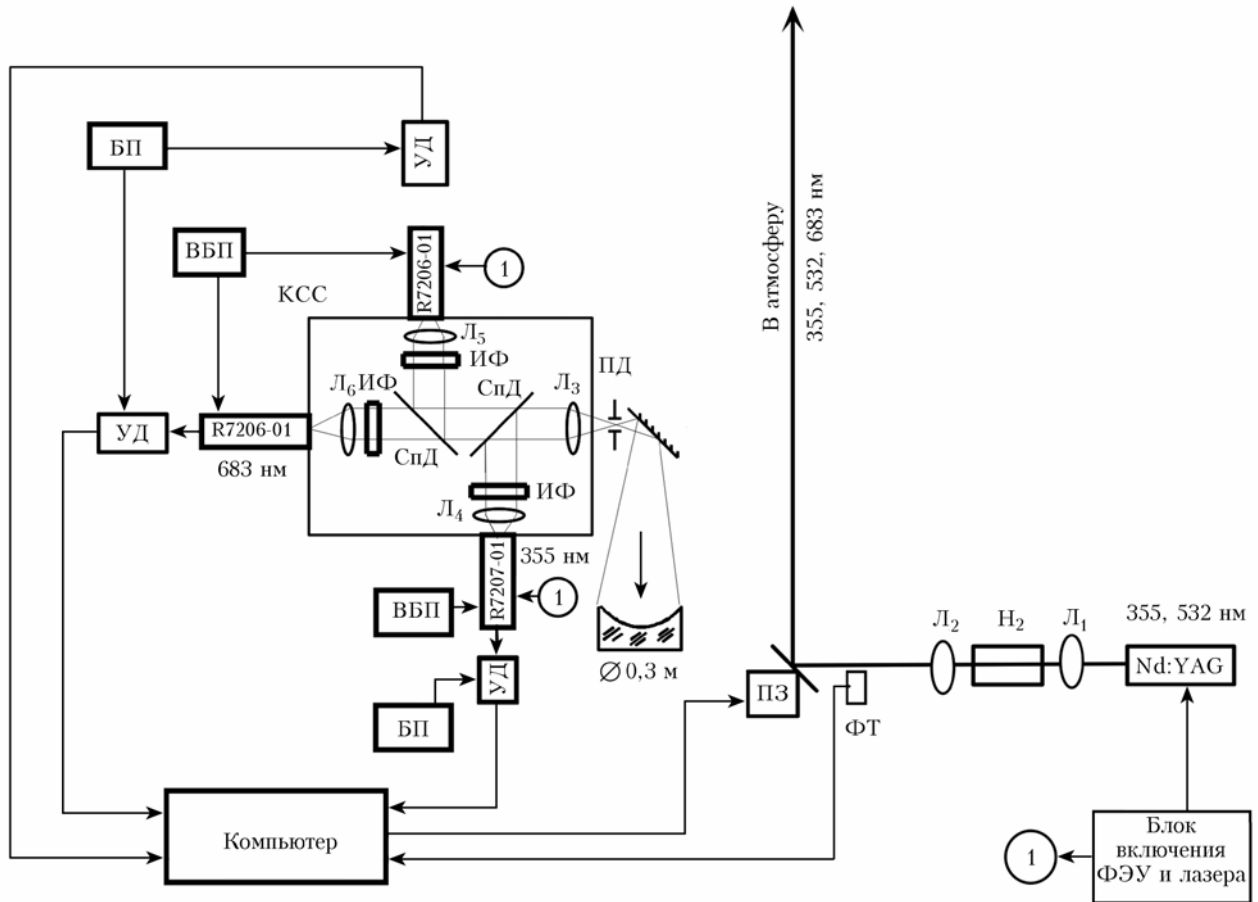


Рис. 1. Структурная схема трехчастотного лидара для зондирования стратосферного аэрозоля: Nd:YAG – твердотельный лазер; H_2 – ячейка ВКР-преобразования с водородом; ПЗ – автоматизированное поворотное зеркало; ПД – полявая диафрагма; КСС – кювета спектральной селекции с ФЭУ; Л – линзы; СпД – спектроделители; ИФ – интерференционные фильтры; УД – усилители-дискриминаторы; БП – блоки питания; ВБП – высоковольтные блоки питания; ФТ – фототранзистор запуска счетчика фотонов

длинах волн, реализованное в одном пучке зондирования, направляется в атмосферу поворотным зеркалом. Зеркало установлено на автоматизированный юстировочный узел, разработанный на основе шаговых двигателей с управлением от компьютера. Оптические лидарные сигналы регистрируются приемным телескопом, который разработан по схеме Ньютона на основе зеркала диаметром 0,3 м.

К корпусу приемного телескопа пристыкована кювета спектральной селекции, выделяющая оптические сигналы на отдельных длинах волн зондирования. Для регистрации лидарных сигналов используются ФЭУ фирмы HAMAMATSU: R7206-01 на длинах волн 532 и 683 нм, R7207-01 на длине волны 355 нм. Регистрация осуществляется в режиме счета импульсов фототока.

Разработанная система позволяет регистрировать лидарные сигналы до высоты верхней границы стратосферного аэрозольного слоя ~ 30 км.

Из данных одночастотного зондирования восстанавливаются оптические характеристики стратосферного аэрозольного слоя (САС) в определенном интервале высот H : вертикальный профиль коэффициента обратного аэрозольного рассеяния и от-

ношение рассеяния $R(H)$ – отношение суммы коэффициентов обратного аэрозольного и молекулярного рассеяния к последнему.

Из данных трехчастотного зондирования уже может быть определена спектральная зависимость коэффициентов обратного аэрозольного рассеяния. На рис. 2, а в виде профилей отношения рассеяния $R(H)$ приведен пример трехчастотного зондирования СА в условиях присутствия следов вулканогенного аэрозоля, образовавшегося после извержений вулканов Окмок и Касаточи (июль–август 2008 г., Алеутские острова). Наблюдаются общее увеличение аэрозольного содержания (фоновые значения $R(H)$ в нижней стратосфере на длине волны 532 нм ~ 1,15) и выраженный аэрозольный слой на высоте около 16 км. Результаты измерений микроструктурных характеристик стратосферного аэрозоля для фонового состояния стратосферы и для условий ее возмущения взрывными извержениями вулканов представлены в [8].

На рис. 2, б показана восстановленная спектральная зависимость коэффициентов аэрозольного ослабления.

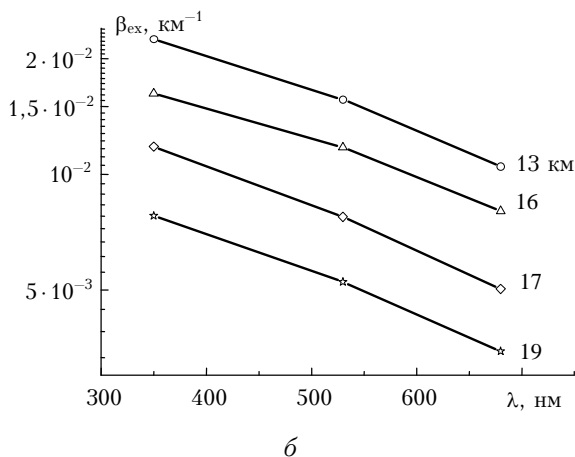
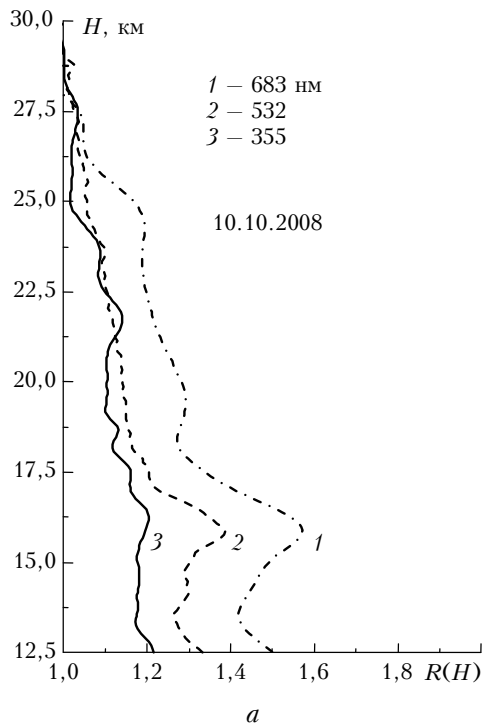


Рис. 2. Высотные профили отношения рассеяния по данным измерений 10 октября 2008 г. (а) и спектральная зависимость коэффициентов аэрозольного ослабления на различных высотах (б)

3. Лидар для измерений вертикального распределения озона в верхней тропосфере—стратосфере

Зондирование стратосферного озона методом дифференциального поглощения и рассеяния осуществляется на длинах волн 308/353 нм, 353 нм — первая стоксова компонента ВКР-преобразования излучения ХеС1 эксимерного лазера (модель LPX 120i фирмы «Lambda Physik») (308 нм) в водороде соответственно [9].

Лидарные сигналы регистрируются приемным зеркалом диаметром 0,5 м на ФЭУ R7207-01 с усилителями-дискриминаторами С3866 фирмы

«HAMAMATSU». Получаемые лидарные сигналы на длинах волн 308 и 353 нм обеспечивают концентрационную чувствительность метода ДП, достаточную для определения концентрации стратосферного озона на высотах 13–35 км, т.е. в слое с максимальным содержанием озона, где его концентрация составляет $(2-6) \cdot 10^{12}$ мол/см³. Длительный период лидарных наблюдений за стратосферным озоном с 1989 г. показал, что наиболее значимая часть для исследований озоносферы расположена в нижней стратосфере, где озон подвержен влиянию динамического фактора. Для тропосферных измерений озона обычно используются эксимерный КгF-лазер (248 нм) или 4-я гармоника Nd:YAG-лазера (266 нм) в сочетании с техникой ВКР-преобразования в Н₂, D₂, СО₂ и других газах [10–13]. Исследование вертикального распределения концентрации озона в высотном диапазоне 5–18 км на СЛС осуществляется на длинах волн 299/341 нм, соответственно первая и вторая стоксовы компоненты ВКР-преобразования четвертой гармоники (266 нм) основной частоты излучения Nd:YAG-лазера (модель LS-2134UT фирмы LOTIS ТП, Минск) в водороде.

С целью исследования процессов стратосферно-тропосферного обмена нами были проведены предварительные численные оценки возможностей зондирования вертикального распределения озона (ВРО) в верхней тропосфере—нижней стратосфере на паре длин волн 299/341 нм [14]. Расчеты показали, что использование $\lambda_{on} = 299$ нм, на которой сечение поглощения озоном σ больше, чем на $\lambda_{on} = 308$ нм, сказалось на снижении потолка зондирования примерно до 22 км (озоновый максимум в Томске расположен в высотном интервале 19–21 км), но при этом появилась возможность измерений озона в тропосфере от высоты ~5 км. Ошибка определения концентрации озона находится в пределах 4–10% до высот около 20 км.

На рис. 3 приведена блок-схема разработанного лидара. На рис. 4 представлен вид лидарных сигналов и восстановленный профиль концентрации озона соответственно. Сигналы регистрировались в режиме счета импульсов фототока по 25 000 выстрелов (время накопления ~30 мин). Достигнутый потолок регистрации сигналов на длине волны 299 нм составил более 20 км. Профиль ВРО (рис. 4, б) приведен в сравнении со среднеширотной зимней моделью [15]. Восстановленный профиль и модельная кривая качественно совпадают. Отличие измеренного профиля от модельного является естественным для динамики озона в отдельные дни наблюдений.

Следует отметить, что для зондирования озона в области высот 5–20 км лидар на основе эксимерного КгF-лазера дороже, более сложен в эксплуатации, так как требует особо чистых газов для рабочей смеси, частой очистки или замены резонаторной оптики, поэтому для исследования озона в верхней тропосфере—нижней стратосфере лидар на основе Nd:YAG-лазера предпочтительнее.

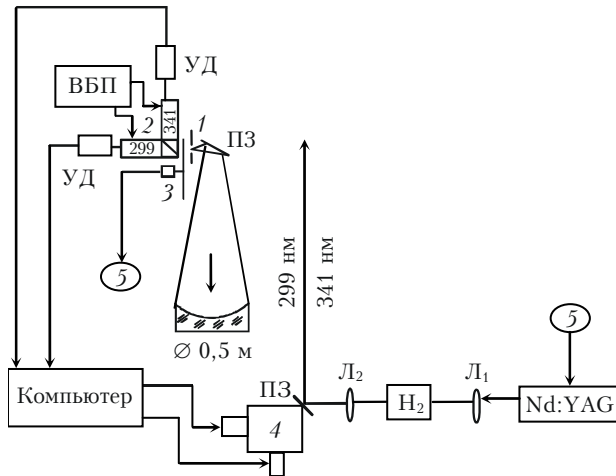


Рис. 3. Блок-схема лидара для зондирования озона в тропосфере–стратосфере: 1 – полевая диафрагма; 2 – кювета спектральной селекции с ФЭУ; 3 – электромеханический обтюратор; ПЗ – поворотное зеркало; 4 – автоматизированный юстировочный узел выходного поворотного зеркала; Nd:YAG – лазер; H₂ – ячейка ВКР-преобразования с водородом; УД – усилители-дискриминаторы; ВБП – высоковольтные блоки питания; Л₁, Л₂ – линзы; 5 – система синхронизации времени срабатывания обтюратора и послышки лазерных импульсов

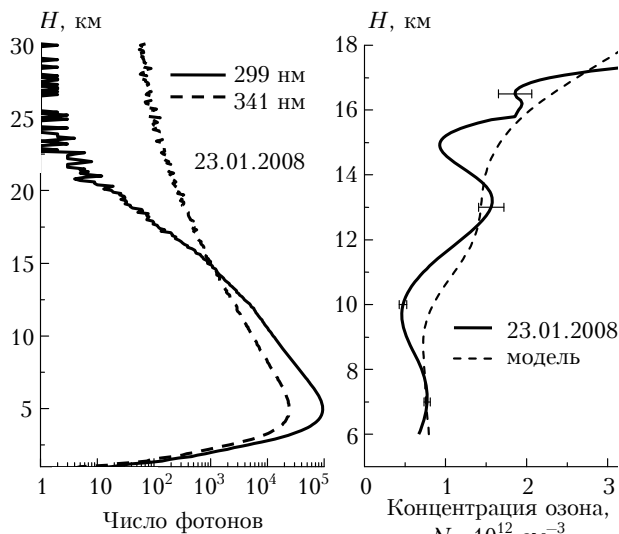


Рис. 4. Лидарные сигналы (а) и восстановленный профиль концентрации ВРО в сравнении с моделью Крюгера (б)

4. Потенциальные возможности измерений температуры в стратосфере – мезосфере

На СЛС проводятся измерения профилей вертикального распределения температуры в стратосфере–мезосфере. 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. Регистрация слабых сигналов КР от атмосферного азота на $\lambda = 607$ нм осуществляется приемным зеркалом диаметром 2,2 м. Сигнал регистрируется до высот ~ 30 км (рис. 5, а).

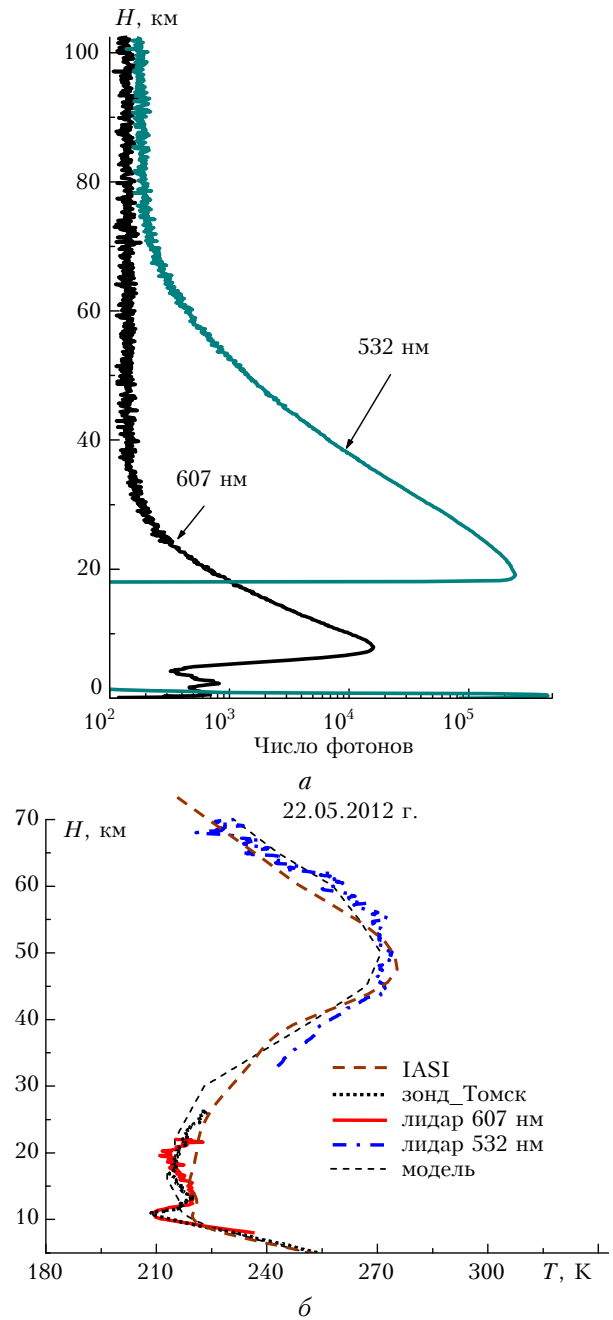


Рис. 5. Лидарные сигналы обратного упругого (532 нм) и комбинационного (607 нм) рассеяния (а) и одновременные лидарные, шар-зондовые и спутниковые (прибор IASI) измерения температуры (б)

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.

Проводилось сравнение результатов лидарных измерений температуры с одновременными шарзондовыми измерениями в Томске и спутниковыми измерениями (прибор IASI).

Данные по одновременным лидарным, шарзондовым и спутниковым измерениям имеются за 22 мая 2012 г. Результаты представлены на рис. 5, б.

Спутник IASI: координаты 56,39° с.ш.; 85,56° в.д.; время измерения: 15:44 GMT.

Модель – [16].

Лидарные измерения и запуск шар-зонда в Томске начались одновременно в 24:00 местного времени 22 мая (местное время = GMT + 7 ч).

Прежде всего, необходимо отметить практически полное совпадение профилей вертикального распределения температуры в нижней стратосфере из данных лидарных измерений по сигналам комбинационного рассеяния от молекулярного азота на длине волны 607 нм и данных шар-зонда. При этом наблюдается выраженная тропопауза на высоте около 11 км. Спутниковые измерения тропопаузу так четко не прописывают и превышают шарзондовые значения температуры.

В верхней стратосфере–мезосфере полного совпадения профилей температуры, полученных из данных спутниковых измерений и лидарных измерений по обратному молекулярному рассеянию на длине волны 532 нм, не наблюдается. Разброс значений достигает 7–8 К, что можно объяснить погрешностью обоих приборов и пространственно-временным разнесением измерений.

5. Возможности зондирования облачности

На рис. 6 представлены примеры результатов измерений временной динамики развития облачности среднего и верхнего ярусов. Зондирование осуществлялось Nd:YAG-лазером на длине волны 1060 нм (рис. 6, а) и лазером на парах меди на длине волны 511 нм (рис. 6, б). В качестве демонстрации возможностей лидарной системы показаны фрагменты разверток вертикальных лидарных профилей S -функции, которая выражается как $S(H) = (N(H) - N_{\text{фон}})H^2$, где $N(H)$ – регистрируемый лидарный сигнал; $N_{\text{фон}}$ – фоновый сигнал; H – высота [17].

Лазер Nd:YAG имеет частоту следования импульсов 20 Гц, длительность импульса 9 нс. Лазер на парах меди – 5 кГц, длительность импульса 5 нс. Средняя мощность излучения лазеров примерно одинакова и составляет 2 Вт. Благодаря большой частоте следования импульсов временное разрешение при зондировании лазером на парах меди лучше, чем при зондировании Nd:YAG-лазером, что позволяет рассматривать более тонкую временную динамику развития облачности.

Кроме того, на СЛС реализовано: зондирование влажности в тропосфере по сигналам комбинационного рассеяния от молекул водяного пара и азота на длинах волн 347 и 332 нм соответственно при накачке лазерным импульсом на длине волн 308 нм [18].

6. Результаты тестовых экспериментов по газоанализу с помощью перспективных для лидарного зондирования многоволновых ИК-лазеров

Для практической реализации лидарного газоанализа и расширения списка зондируемых на СЛС атмосферных газов необходимо наличие эффективного

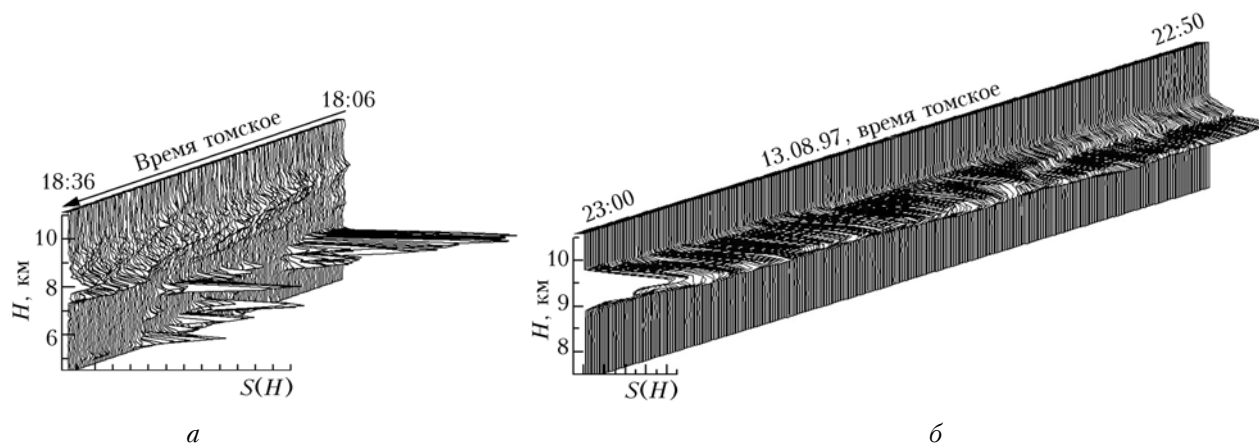


Рис. 6. Примеры временной динамики развития облачности при зондировании Nd:YAG-лазером на длине волны 1060 нм (а) и лазером на парах меди на длине волны 511 нм (б)

лазерного источника, способного перекрывать перестраиваемым по частоте излучением широкие спектральные интервалы в ИК-диапазоне спектра, являющемся наиболее информативным с точки зрения исследования газового состава атмосферы. Этим требованиям в наибольшей степени удовлетворяют многоволновые ИК на парогазовых активных средах, прежде всего обертоновый СО-лазер [20] и Sr-лазер [19]. В данном разделе представлены результаты тестовых экспериментов по лазерному зондированию газового состава атмосферы с помощью перспективных для газоанализа ИК-лазеров.

Для информативных длин волн зондирования метана и закиси азота была решена обратная задача восстановления концентраций данных газовых компонентов при анализе измеренных с помощью созданной на основе обертонового СО-лазера установки [20] коэффициентов поглощения. Результаты восстановления концентраций и сравнение с калиброванными данными приведены в табл. 2, из которой видно, что на точность восстановления concentra-

ций большое влияние оказывает точность измерения коэффициентов поглощения исследуемых газовых компонент.

На выбранных информативных длинах волн [19] были проведены тестовые эксперименты по лазерному зондированию влажности атмосферы с помощью созданного в составе СЛС-лидара дифференциального поглощения (рис. 7) на основе отпаянного стронциевого лазера.

В лидаре излучение Sr-лазера последовательно на линии λ_{on} поглощения и вне линии λ_{off} через диафрагму с помощью выходного зеркала посылается на трассу. В качестве длины волны с сильным поглощением выбрана линия излучения $\lambda_{on} = 3,0110$ мкм, а в качестве референтной $\lambda_{off} = 1,0917$ мкм. Требуемая длина волны выбирается поворотом дифракционной решетки. Длина трассы составляет 11 м (в один конец). Место расположения установки не позволило выбрать измерительную трассу большей длины. На конце трассы расположен зеркальный отражатель. Отраженное

Таблица 2

Обратная задача восстановления концентраций газовых компонент при работе на выбранных информативных длинах волн

Длина волны, мкм	Волновое число, см ⁻¹	Энергия импульса излучения, мДж	Коэффициент поглощения, см ⁻¹		Концентрация, %		Погрешность нахождения концентрации, %
			расчет	эксперимент	калиброванная смесь	эксперимент	
N ₂ O							
3,877	2578,715	1,97	0,1178	0,0953	4	4,2	5
CH ₄							
3,440	2906,723	17,2	0,0247	0,0078	4	5,1	28

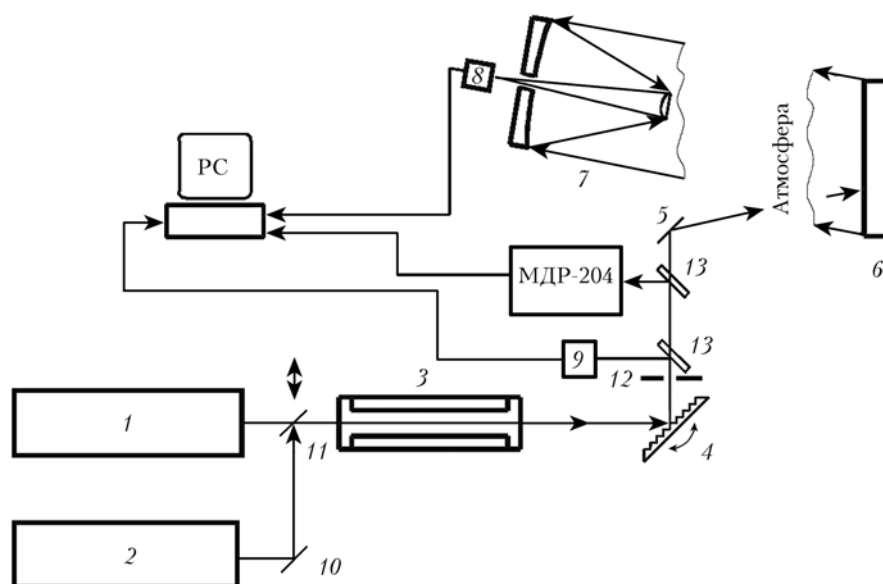


Рис. 7. Блок-схема лидара: 1 – Sr-лазер; 2 – He–Ne-лазер; 3 – нагреваемая кювета с парами воды; 4 – дифракционная решетка; 5 – выходное зеркало; 6 – зеркальный отражатель; 7 – приемный телескоп; 8 – фотодиод ФД-38; 9 – пироприемник; 10 – поворотное зеркало; 11 – подвижное зеркало; 12 – диафрагма; 13 – полупропускающая пластина

излучение собирается телескопом, собранным по схеме Кассегрена с главным приемным зеркалом диаметром 25 см. В качестве приемника используется фотодиод ФД-38. Часть излучения с помощью пластин из CaF₂ отводится на пироприемник для контроля мощности излучения, посылаемого в атмосферу, и монохроматор МДР-204 для определения длины волны выходного излучения.

Для контроля результатов измерений влажности использовались два психрометра, расположенные на разных концах измерительной трассы. Был проведен ряд измерений влажности. На рис. 8 представлены результаты тестовых измерений влажности за 19.04.2011.

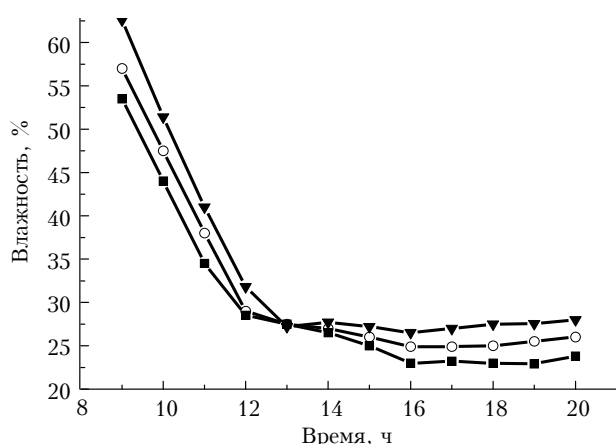


Рис. 8. Результаты тестовых измерений влажности двумя методами с помощью психрометра и лидара (психрометр – треугольники и квадраты, лидар – кружки)

Видно, что данные измерений двумя методами (психрометр и лидар) находятся в хорошем согласии (полученные расхождения не превышают 10%). При этом расхождения в показаниях психрометров на разных концах трассы зондирования объясняются погрешностью этих приборов, которая составляет для измеренной влажности около 5,5%.

Заключение

Следует отметить, что СЛС долгое время оставалось единственной точкой проведения регулярных лидарных наблюдений за стратосферой (с 1986 г.) не только на огромной территории Сибири, но и фактически всей России. В азиатской части России только с 2005 г. начались разработка, а в дальнейшем и функционирование измерительных лидарных комплексов, во Владивостоке и Сургуте в рамках организации сети лидарных станций стран СНГ по исследованиям атмосферного озона и аэрозоля (сеть CIS-LiNet). Развитие координированных работ в рамках сети CIS-LiNet станет одним из направлений дальнейших исследований.

Разработанная концепция исследования физических механизмов стратосферных изменений основывается на получении и последующем статистическом, корреляционном анализе рядов данных долговременных регулярных измерений. Такой анализ

позволяет разрабатывать эмпирические модели параметров атмосферы; определять сезонные, квазидвухлетние и другие периодические циклы изменений; исследовать механизмы, определяющие динамику и взаимосвязи измеряемых параметров; обнаруживать кратковременные возмущения стратосферы и постепенно накапливающиеся изменения под действием природных и антропогенных факторов; в конечном итоге определять и прогнозировать тренды стратосферных изменений с оценкой степени их влияния на возможные климатоэкологические изменения. Подобный подход к исследованиям атмосферных изменений на основе регулярного комплексного дистанционного оптического мониторинга – одно из приоритетных направлений в современной мировой практике исследований атмосферы.

Постоянное развитие лазерной техники, получение новых линий генерации позволяют расширить круг измеряемых параметров атмосферы различными методами лазерного зондирования.

Данные спутниковых измерений, полученные на станции приема спутниковой информации ИОА СО РАН, предоставлены в.н.с. Афониним Сергеем Васильевичем.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 13-05-98074 р_сибирь_а, Минобрнауки РФ (госконтракты № 11.519.11.6033, 14.518.11.7063, Соглашение № 8325) и Проекта Президиума РАН № 4.5.

1. *Fiocco G., Grams G.* Observation of aerosol layer at 20 km by optical radar // *J. Atmos. Sci.* 1964. V. 21, iss. 3. P. 323–324.
2. *Межерис Р.* Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.
3. URL: <http://iclas.hamptonu.edu>
4. *NDSC.* Network for the Detection of Stratospheric Change. 2001. 27 p. (<http://www.ndsc.ncep.noaa.gov/NDSCbrochure.pdf>).
5. *Bösenberg J., Ansmann A., Baldasano J., Balis D., Böckmann C., Calpini B., Chaikovskiy A., Flamant P., Haggard A., Mitev V., Papayannis A., Pelon J., Resendes D., Schneider J., Spinelli N., Trickle T., Vaughan G., Visconti G., Wiegner M.* EARLINET-A European aerosol research lidar network // *Adv. in Laser Remote sensing: Selected papers 20-th Int. Laser Radar Conference (ILRC).* Vichi, France. 10–14 July 2000. P. 155–158.
6. *Murayama T., Sugimoto N., Matsui I., Lio Zh., Sakai T., Shibata T., Iwasaka Y., Won J.G., Yoon S.C., Li T., Zhou J., Hu H.* Lidar Network observation of Asian dust // *Adv. in Laser Remote sensing: Selected papers 20-th Int. Laser Radar Conference (ILRC).* Vichi, France. 10–14 July 2000. P. 169–177.
7. *Чайковский А.П., Иванов А.П., Балин Ю.С., Ельников А.В., Тулинов Г.Ф., Плюснин И.И., Букин О.А., Чен Б.Б.* Лидарная сеть CIS-LiNet для мониторинга аэрозоля и озона: методология и аппаратура // *Оптика атмосф. и океана.* 2005. Т. 18, № 12. С. 1066–1072.
8. *Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Зуев В.В., Макеев А.П., Макиенко Э.В., Невзоров А.В.* Измерения микроструктурных характеристик фонового и вулканогенного стратосферного аэрозоля на основе многочастотного лазерного зондирования в Томске // *Оптика атмосф. и океана.* 2010. Т. 23, № 9. С. 803–810.

9. Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Невзоров А.В. Модернизация измерительного комплекса Сибирской лидарной станции // Оптика атмосфер. и океана. 2004. Т. 17, № 10. С. 857–864.
10. Galani E., Balis D., Zanis P., Zerefos C., Papayannis A., Wemli H., Gerasopoulos E. Observations of stratosphere-to-troposphere transport events over the eastern Mediterranean using a ground-based lidar system // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108, N 12. P. STA12/1–STA12/10.
11. Masahisa Nakazato, Tomohiro Nagai, Tetsu Sakai, Yasuo Hirose. Tropospheric ozone differential-absorption lidar using stimulated Raman scattering in carbon dioxide // Appl. Opt. 2007. V. 46, N 12. P. 2269–2279.
12. Букреев В.С., Вартапетов С.К., Веселовский И.А., Галустов А.С., Ковалев Ю.М., Прохоров А.М., Светогоров Е.С., Хмелевцов С.С., Ли Ч.Х. Лидарная система для зондирования стратосферного и тропосферного озона на основе эксимерных лазеров // Квант. электрон. 1994, Т. 21, № 6. С. 591–596.
13. Eisele H., Scheel H.E., Sladkovic R., Trickl T. High resolution lidar measurements of stratosphere–troposphere exchange // J. Atmos. Sci. 1999. V. 56, N 3. P. 319–330.
14. Зуев В.В., Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Невзоров А.В. Лидар дифференциального поглощения для зондирования озона в верхней тропосфере – нижней стратосфере // Оптика атмосфер. и океана. 2008. Т. 21, № 10. С. 880–883.
15. Krueger A.J., Minzner R.A. A mid-latitude ozone model for the 1976 U.S. standard atmosphere // J. Geophys. Res. D. 1997. V. 81, N 24 P. 4477–4481.
16. Итополитов И.И., Комаров В.С., Мицель А.А. Спектроскопические методы зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1985. С. 4–44.
17. Зуев В.В., Андреев М.И., Бурлаков В.Д., Ельников А.В., Невзоров А.В., Смирнов С.В. Лидарная система для исследования облачности в дневное и ночное время // Оптика атмосфер. и океана. 2004. Т. 11, № 5. С. 477–479.
18. 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 атмосфер. и океана. 2003. Т. 16, № 4. С. 374–376.
19. Бочковский Д.А., Васильева А.В., Матвиенко Г.Г., Полуни Ю.П., Романовский О.А., Солдатов А.Н., Харченко О.В., Юдин Н.А., Яковлев С.В. Применимость лазера на парах стронция для решения задач лазерного зондирования газового состава атмосферы // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 11. С. 985–989.
20. Ионин А.А., Климачев Ю.М., Козлов А.Ю., Котков А.А., Матвиенко Г.Г., Романовский О.А., Харченко О.В., Яковлев С.В. Возможности применения обертонового СО-лазера для дистанционного газоанализа атмосферы // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 8. С. 702–707.

V.D. Burlakov, S.I. Dolgii, A.P. Makeev, G.G. Matvienko, A.V. Neuzorov, A.N. Soldatov, O.A. Romanovskii, O.V. Kharchenko, S.V. Yakovlev. Lidar technologies for remote sensing of atmospheric parameters.

We considered the characteristics of modernized measurement complex of Siberian Lidar Station (SLS), as well as some other lidar installations, developed at V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, in collaboration with Tomsk State University, and their capabilities for sensing the atmospheric parameters. The lidar measurements of the vertical profiles of temperature are presented and compared with balloon-sonde and satellite data. A lidar for measurements of the vertical ozone distribution in the upper troposphere–stratosphere is described. The reconstructed profiles of the vertical ozone distribution are presented. We give the results of test experiments on laser sensing of the atmospheric gas composition with the help of IR lasers, promising for gas analysis.