

ПРИМЕНЕНИЕ ЛИДАРОВ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ

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

USE OF LIDARS IN SOLVING PROBLEMS OF REMOTE SENSING OF ATMOSPHERIC PARAMETERS

A.P. Makeyev, V.D. Burlakov, S.I. Dolgy, A.V. Nevzorov

В докладе описываются технические характеристики модернизированного лидарного комплекса Сибирской лидарной станции. Представлены возможные методы дистанционных измерений радиационно-значимых параметров атмосферы, таких как стратосферный аэрозоль и озон.

The report describes the technical characteristics of modernized lidar complex of Siberian Lidar Station. The possible methods of remote measurements of radiatively significant parameters of the atmosphere, such as stratospheric aerosol and ozone, are presented.

Введение

Огромные возможности применения методов лазерного зондирования для мониторинга параметров атмосферы объясняется тем, что при распространении в атмосфере электромагнитного излучения оптического диапазона наблюдается большое число физических процессов взаимодействия излучения с составляющими атмосферы [Межерис, 1987]. Наземные лидарные сети являются составной частью программы глобальных атмосферных наблюдений. Европейская аэрозольная лидарная сеть (EARLINET) [Ansmann, 2000] включает 22 лидарные станции для исследований процессов переноса аэрозольных загрязнений природного и антропогенного происхождения в основном в тропосфере над Европой. В конце 2004 г. на территории Евроазиатского континента была организована еще одна лидарная сеть – сеть стран СНГ (CIS-LiNet) [Балин, 2005], которая предназначена для изучения процессов переноса аэрозоля и озона. Сеть объединяет 6 лидарных станций России, Беларуси и Кыргызстана, в том числе Сибирскую лидарную станцию (СЛС) Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН [Бурлаков, 2008].

Измерительный комплекс сибирская лидарная станция

Многоканальный лидарный комплекс Сибирской лидарной станции, в Томске (56.5° N; 85° E), 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. Комплекс позволяет получать информацию о вертикальном распределении ряда основных радиационно-значимых параметров атмосферы: стратосферно-тропосферный озон и аэрозоль, температура, влажность.

В таблице приведены основные технические характеристики лазерных источников и приемных оптических элементов комплекса. Данные о микроструктурных параметрах СА, которые характеризуют спектр размеров аэрозольных частиц, определяются методом многочастотного зондирования на длинах волн 355, 532 и 683 нм (355 нм – третья гармоника Nd:YAG лазера, 683 нм – первая стоксовая компонента преобразования линии 532 нм в ячейке с

водородом высокого давления на основе эффекта вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР)).

Лидар для измерения стратосферного аэрозоля

Главной отличительной особенностью 3-х частотной схемы зондирования характеристик СА является то, что длины волн 355, 532 и 683 нм реализуются в одном соосном пучке излучения с использованием одного лазерного источника. Структурная схема лидарного приемопередатчика приведена на рис. 1. Основным лазером системы является Nd:YAG лазер – модель LS-2132T-LBO Минской фирмы «LOTIS ТП», работающий на длинах волн 532 и 355 нм. 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 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 примыкает 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. На рис. 2 в виде профилей отношения рассеяния R(H) приведен пример трехчастотного зондирования СА в условиях присутствия следов вулканогеенного аэрозоля, образовавшегося после извержений вулканов Окмок и Касаточи (июль–август 2008 г., Алеутские острова). Наблюдается 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.

Технические характеристики лидарного комплекса

Параметры лидара	Измеряемые характеристики								
	Аэрозоль				Температура		Озон		
	Передатчик								
Длина волны зондирования, λ нм	511	532	355	683	1064	532	308 353	299 341	
Энергия импульса, мДж (соотв. λ)	1	100	40	60	200	100	100 50	25 20	
Частота следования, Гц (соотв. λ)	2500	20	20	20	20	20	50–200	15	
Расходимость, мрад	~01					0.1	0.1–0.3	0.1–0.3	
	Приемник								
Метод зондирования	Обратное упругое рассеяние на аэрозолях и молекулах					Молекул. рассеяние	КР от N ₂	Диф. поглощение и рассеяние	
Длина волны, 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

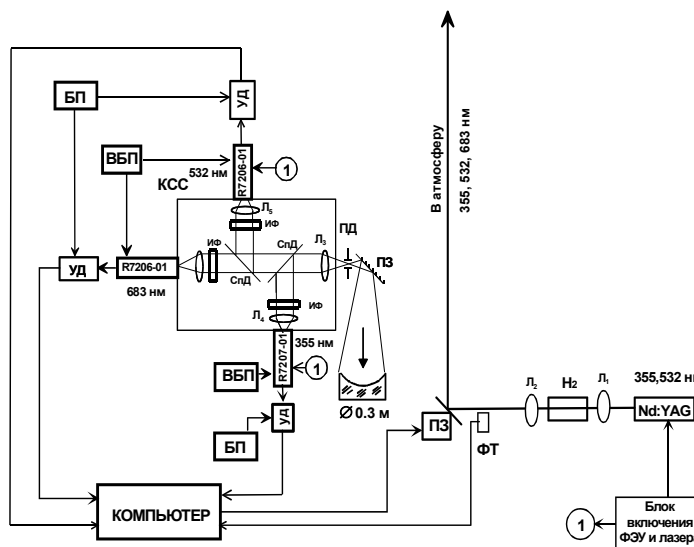


Рис. 1. Структурная схема трехволнового лидара для зондирования стратосферного аэрозоля: Nd:YAG – твердотельный лазер; Н₂ – ячейка ВКР преобразования с водородом; ПЗ – автоматизированное поворотное зеркало; ПД – полевая диафрагма; КСС – кювета спектральной селекции с ФЭУ; Л – линзы; СпД – спектроделители; ИФ – интерференционные фильтры; УД – усилители-дискриминаторы; БП – блоки питания; ВБП – высоковольтные блоки питания; ФТ – фототранзистор запуска счетчика фотонов.

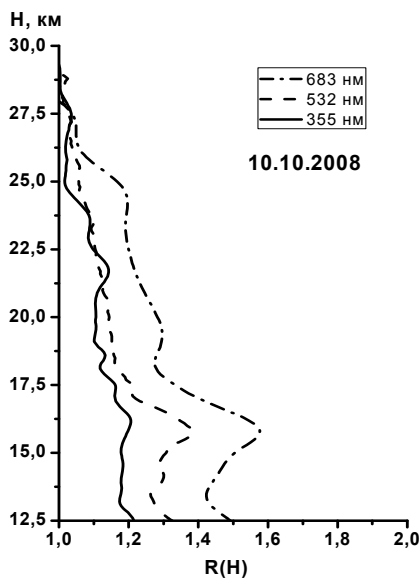


Рис. 2. Высотные профили отношения рассеяния по данным измерений 10 октября 2008 г.

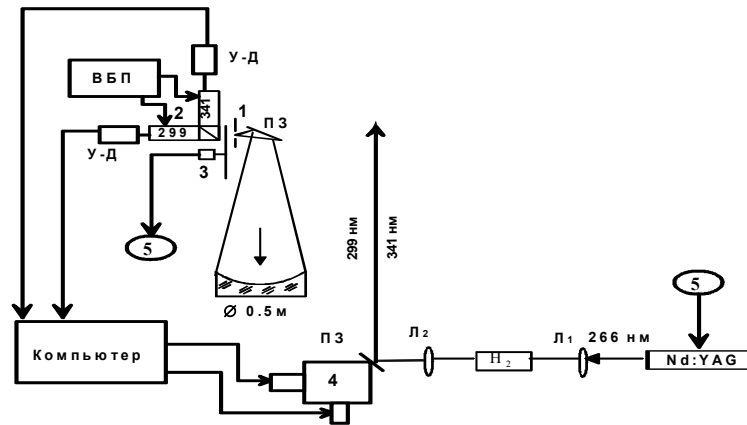


Рис. 3. Блок-схема лидара для зондирования озона в тропосфере – стратосфере. 1 – полявая диафрагма; 2 – кювета спектральной селекции с ФЭУ; 3 – механический обтюратор; ПЗ – поворотные зеркала; 4 – автоматизированный юстировочный узел выходного поворотного зеркала; Nd:YAG – твердотельный лазер; H₂ – ячейка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

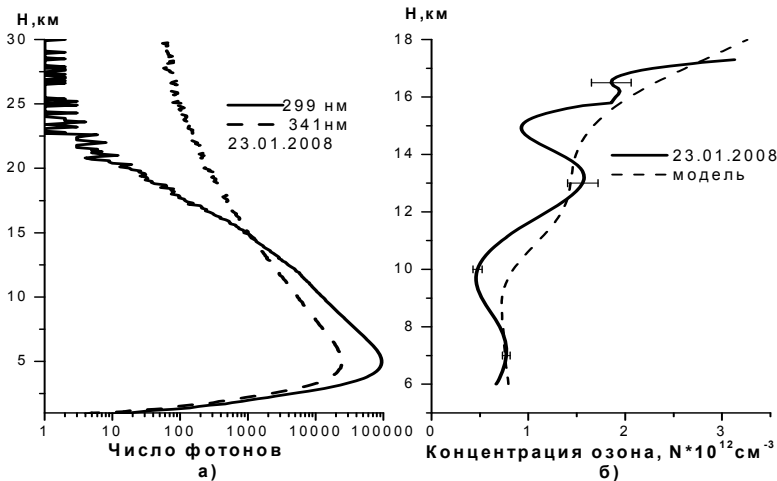


Рис. 4. Лидарные сигналы (а) и восстановленный профиль концентрации ВРО в сравнении с моделью Крюгера (б).

Из данных трехчастотного зондирования уже может быть определена спектральная зависимость коэффициентов обратного аэрозольного рассеяния и восстановлены микроструктурные характеристики СА. Результаты измерений микроструктурных характеристик стратосферного аэрозоля для фонового состояния стратосферы и для условий ее возмущения взрывными извержениями вулканов представлены в [Бурлаков, 2010].

Лидар для измерений вертикального распределения озона в верхней тропосфере – нижней стратосфере

Лидарные измерения вертикального распределения концентрации озона (ВРО) в стратосфере осуществляются на основе метода дифференциального поглощения (ДП) рассеянной назад энергии на длинах волн $\lambda_{\text{оп}}=308$ нм и $\lambda_{\text{оф}}=353$ нм. Концентрация озона по методу ДП рассчитывается из отношения интенсивности лидарных сигналов на $\lambda_{\text{оп}}/\lambda_{\text{оф}}$. Лидарные сигналы регистрируются приемным зеркалом диаметром 0.5 м на ФЭУ R7207-01 с усилителями-дискриминаторами С3866 фирмы «НАМАМАТСУ». Длительный период лидарных наблюдений за стра-

тосферным озоном с 1989 г. показал, что наиболее значимая часть для исследований озоносферы расположена в нижней стратосфере, где озон подвержен влиянию динамического фактора.

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 [Бурлаков, 2008]. Расчеты показали, что использование $\lambda_{\text{оп}}=299$ нм, на которой сечение поглощения озоном σ больше чем на $\lambda_{\text{оп}}=308$ 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 лидара.

На рис. 4 в качестве примера 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 Крюгера. Восстановленный профиль и модельная кривая качественно совпадают. Отличие измеренного профиля от модельного является естественным для динамики озона в отдельные дни наблюдений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Миннауки и Образования (Соглашение № 14.604.21.0100 – уникальный идентификатор RFMTFI60414X0100), Российского научного фонда (Соглашение № 14-27-. 00022) и гранта президента РФ по поддержке ведущих научных школ (НШ – 4714.2014.5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Балин Ю.С., Букин О.А., Ельников А.В. и др. Лидарная сеть CIS-LiNet для мониторинга аэрозоля и озона: методология и аппаратура // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18, № 12. С. 1066–1072.

Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Зуев В.В. и др. Измерения микроструктурных характеристик фонового и вулкано-генного стратосферного аэрозоля на основе многочастотного лазерного зондирования в Томске (56.5° N; 85° E) // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 09. С. 803–810.

Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Зуев В.В., Невзоров А.В. Лидар дифференциального поглощения для зондирования озона в верхней тропосфере – нижней стратосфере // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 10. С. 880–883.

Бурлаков В.Д., Зуев В.В. Сибирская лидарная станция: 20 лет оптического мониторинга стратосферы. – Томск. Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2008. 226 с
Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.

Ansmann A., Bösenberg J., Baldasano J., et al. EAR-LINET-A European aerosol research lidar network // Advances in Laser Remote sensing: Selected papers 20-th Int. Laser Radar Conference (ILRC). Vichi. France. 10–14 July 2000. Vichi, 2000. P. 155–158.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия