

УДК 621.3.038.8.004.14

## ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ МНОГОВОЛНОВОГО АЭРОЗОЛЬНОГО ЛИДАРА ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

Н.Н. Волков

Описывается возможность дистанционного зондирования атмосферы при помощи лидара, позволяющего получать коэффициенты обратного рассеяния и экстинкции аэрозоля в диапазоне длин волн от 355 до 1064 нм. Оцениваются параметры многоволнового лидара для мониторинга аэрозоля в высотном диапазоне 1–10 км.

**Ключевые слова:** аэрозоль, лидар, рамановское рассеяние.

### Введение

Увеличение количества антропогенных аэрозольных выбросов в атмосферу, повышение концентрации  $\text{CO}_2$  и других парниковых газов оказывают воздействие на радиационный баланс планеты, и, как следствие, на ее климат. Следует отметить, что среди перечисленных факторов воздействие аэрозоля на радиационный баланс Земли двояко. Во-первых, аэрозоль влияет на радиационный баланс путем рассеяния и поглощения солнечной радиации (прямое воздействие). Во-вторых, это влияние происходит за счет модификации свойств облаков (косвенное воздействие). Для уменьшения соответствующих погрешностей в климатических моделях необходима глобальная информация об основных микрофизических параметрах аэрозоля, таких как радиус частиц, концентрация и комплексный показатель преломления.

Одним из наиболее перспективных инструментов, способных дистанционно проводить измерения параметров частиц, являются лидары. Малая длина волны излучения, сопоставимая с размером аэрозолей, и высокое пространственное разрешение делают лидары уникальным инструментом для исследования аэрозолей и облаков. Возможности метода значительно расширяются при проведении зондирования одновременно на нескольких длинах волн. Многоволновые системы позволяют получать информацию не только о спектральной зависимости коэффициентов рассеяния аэрозоля, но и о микрофизических параметрах частиц, таких как размер, концентрация и комплексный показатель преломления. Целью работы является оценка параметров многоволнового лидара, предназначенного для исследования аэрозолей различного типа: индустриального, пустынного и вулканического происхождения.

### Существующие методы и средства для измерения параметров аэрозольных частиц атмосферы

Теоретические и экспериментальные исследования последних лет показывают, что измеренные коэффициенты обратного рассеяния и экстинкции аэрозоля могут быть инвертированы в микрофизические параметры частиц путем решения обратной задачи зондирования [1]. Наиболее удобными с практической точки зрения являются лидары на основе Nd:YAG-лазера с генератором третьей гармоники. Такая система позволяет измерять три коэффициента обратного рассеяния ( $\beta$ ) на длинах волн 355, 532, 1064 нм и два коэффициента экстинкции ( $\alpha$ ) на длинах волн 355, 532 нм. Вычисление коэффициентов экстинкции может быть проведено только с использованием рамановского рассеяния на молекулах азота или кислорода [1]. В измерениях, как правило, используется рассеяние на азоте, и длины волн соответствующих рамановских компонент для второй и третьей гармоники Nd:YAG составляют 608 нм и 387 нм. Излучаемая длина волны составляет 355 нм, в то время как после рассеяния длина волны составляет 387 нм, поэтому соответствующая экстинкция пересчитывается на 355 нм с использованием коэффициента Ангстрема. Соответствующая погрешность вычисления коэффициента экстинкции, связанная с неопределенностью выбора параметра Ангстрема, не велика и не превосходит 5%.

Сечение рамановского рассеяния почти на три порядка меньше сечения рэлеевского рассеяния, поэтому для надежной регистрации рамановского сигнала в нижней тропосфере необходимо использовать мощные лазерные источники излучения и приемные телескопы значительной апертуры. В работе проводится оценка параметров лазера и системы регистрации, требуемых для создания многоволнового аэрозольного лидара.

Процесс детектирования рассеянного излучения описывается статистикой Пуассона, и погрешность измерения может быть оценена как  $\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{N}}$ , где  $N$  – количество зарегистрированных фотонов [2].

При измерении лидарного сигнала системой эта ошибка должна составлять не более 0,5%. Таким образом, из одного высотного слоя система должна регистрировать не менее  $4 \cdot 10^4$  фотонов.

Количество детектируемых фотонов может быть оценено из лидарного уравнения [2]:

$$N = \frac{N_L \cdot S \cdot \Delta z \cdot T \cdot \eta \cdot \beta}{z^2} \cdot e^{-2 \int_0^z \alpha(z) dz}, \quad (*)$$

где  $N$  – количество фотонов, принимаемых системой;  $N_L$  – количество фотонов, излучаемых в атмосферу;  $S$  – площадь приемного зеркала телескопа;  $z$  – дистанция зондирования;  $T$  – коэффициент пропускания

оптической системы;  $\eta$  – квантовая эффективность фотоприемника. Коэффициент обратного рассеяния молекул определяется как  $\beta = \sigma \cdot n_{mol}$ , где  $\sigma$  – дифференциальное сечение рассеяния (рэлеевского либо рамановского), а  $n_{mol}$  – концентрация молекул. Коэффициент молекулярной экстинкции  $\alpha$  связан с коэффициентом обратного рассеяния как  $\alpha = \frac{8\pi}{3} \cdot \beta$ .

Задача, описываемая уравнением (1), является неопределенной, поскольку это уравнение содержит произведение неизвестных  $N_L \cdot S \cdot \Delta z \cdot T \cdot \eta$ , а требуемое количество фотонов  $N$  может быть обеспечено как за счет увеличения энергии лазера, так и за счет увеличения апертуры телескопа, либо же за счет увеличения толщины слоя  $\Delta z$ .

**Выбор и расчет параметров многоволнового аэрозольного лидара**

При выборе параметров системы должны приниматься во внимание такие факторы, как стоимость, габариты, энергопотребление и т.д. Расчетные лидарные сигналы, обусловленные молекулярным рассеянием длин волн 355, 532, 1064 нм, показаны на рисунке. Результаты расчетов количества зарегистрированных фотонов за один лазерный импульс и соответствующие частоты счета фотонов на высотах 1 км и 10 км приведены в таблице. Частота счета  $\nu$  связана с количеством фотонов  $N$  как  $\nu = \frac{N}{2\Delta z}$ .

$$\nu = \frac{N}{2\Delta z \cdot c}$$

апертура телескопа принималась равной 400 мм. Телескоп данной апертуры компактен, обеспечивает надежную регистрацию рамановского сигнала и не приводит к необоснованному удорожанию системы. Высотное разрешение  $\Delta z = 100$  м позволяет профилировать аэрозольный состав атмосферы и является достаточным для большинства климатологических задач [3]. Максимальная высота зондирования предполагалась равной 10 км. Энергия излучения составляла 100 мДж на каждой длине волны. Результаты расчетов могут быть легко пересчитаны для любых других параметров системы.

Длина волны приемного канала $\lambda$ , нм	Тип рассеяния	Скорость счета фотонов, принимаемых системой $\nu$ , МГц		Количество фотонов, принимаемых системой $N$	
		1 км	10 км	1 км	10 км
355	Рэлеевское	$1,62 \cdot 10^6$	$3,05 \cdot 10^3$	$10,81 \cdot 10^5$	$2,04 \cdot 10^3$
532		$0,50 \cdot 10^6$	$1,71 \cdot 10^3$	$3,35 \cdot 10^5$	$1,41 \cdot 10^3$
1064		$0,062 \cdot 10^6$	$0,24 \cdot 10^3$	$0,41 \cdot 10^5$	$0,16 \cdot 10^3$
387	Рамановское на $N_2$	$1,61 \cdot 10^3$	3,38	$10,74 \cdot 10^2$	2,26
608		$0,43 \cdot 10^3$	1,51	$2,87 \cdot 10^2$	1,01

Таблица. Параметры многоволновой аэрозольной лидарной системы

При выборе параметров системы следует рассматривать сигнал рамановского рассеяния как наиболее слабый. Из таблицы можно заключить, что на длине волны 608 нм регистрируется один фотон за импульс с высоты 10 км, т.е. для обеспечения требуемой точности измерения должны проводиться в течение 30 мин (при частоте повторения импульсов лазера 20 Гц). Такое временное разрешение достаточно для отслеживания временной эволюции вертикального распределения аэрозоля.

Помимо количества фотонов, определяемых по формуле (\*), при выборе параметров системы необходимо учитывать динамический диапазон изменения лидарного сигнала (который для современных систем регистрации составляет четыре–пять порядков), а также максимальную и минимальную частоту счета фотонов фотодетектором. Лучшие фотоэлектронные умножители (ФЭУ), позволяющие проводить одновременное детектирование в аналоговом режиме и в режиме счета фотонов, надежно работают в диапазоне частот счета  $10^3$ – $10^2$  МГц. На высоте 10 км скорость счета составляет 1,5 МГц для 608 нм, что достаточно для проведения надежных измерений (собственный шум ФЭУ составляет порядка 1 кГц). С уменьшением высоты скорость счета растет и на высоте 1 км достигает  $1,6 \cdot 10^3$  МГц для 387 нм. Следует отметить, что в расчетах не рассматривалось влияние атмосферного аэрозоля. При типичных величинах экстинкции в пограничном слое атмосферы это может приводить к двукратному уменьшению сигнала. Таким образом, скорости счета фотонов в рамановских каналах соответствуют характеристикам детектора. В то же время рэлеевский сигнал на три порядка превосходит рамановский, поэтому для проведения

измерений в каналы упругого рассеяния должны быть введены ослабляющие фильтры с коэффициентами ослабления от 100 до 1000.

В расчетах не рассматривался геометрический фактор перекрытия, характеризующий высоту, на которой лазерный пучок полностью входит в угловое поле телескопа. Для телескопа апертурой 400 мм с угловым полем 0,25 мрад эта высота составляет около 400 м при расходимости лазерного пучка 0,15 мрад. Таким образом, система позволяет производить измерения на высотах от 400 м, однако для этого часть апертуры телескопа должна быть заблокирована, чтобы обеспечить линейный режим работы ФЭУ. На рисунке показаны зависимости скорости счета фотодетектора от высоты зондирования для длин волн 355, 532, 1064 нм.

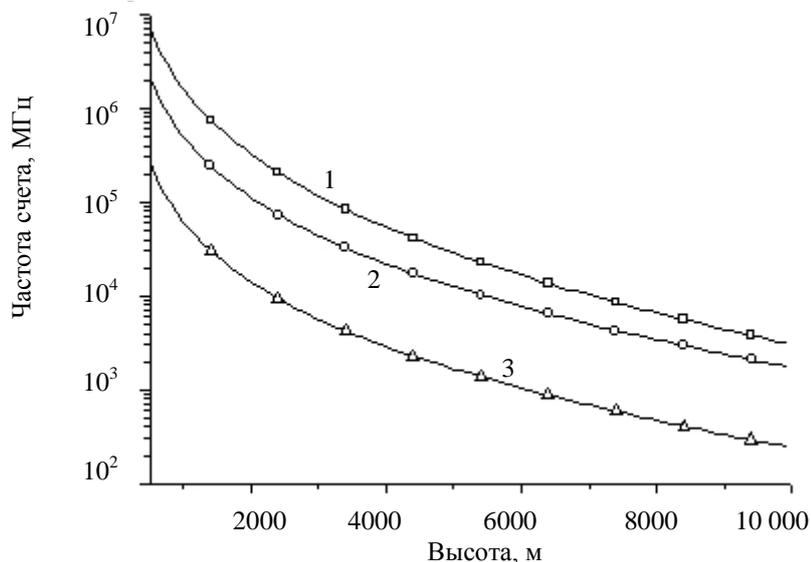


Рисунок. Зависимость частоты счета детектора от высоты зондирования для молекулярного рассеяния на длинах волн 355 нм (1), 532 нм (2) и 1064 нм (3)

### Заключение

Проблема определения параметров лидарной системы является многопараметрической, и выбор конкретной конфигурации определяется спецификой поставленной задачи. В работе была проведена оценка параметров многоволнового рамановского лидара для мониторинга аэрозоля в высотном диапазоне 1–10 км. Проведенные вычисления показывают, что для уверенного приема сигнала рамановского рассеяния азота достаточной является система с апертурой телескопа 400 мм при энергии лазера не менее 100 мДж на длинах волн 355 и 532 нм. Для обеспечения требуемой точности на высоте 10 км измерение должно проводиться в течение 30 мин (при частоте повторения импульсов лазера 20 Гц). На основании проведенных расчетов спроектирована лидарная система, которая должна начать работу в 2012 г. в Центральной аэрологической обсерватории.

### Литература

1. Ansmann A., Muller D. Lidar and atmospheric aerosol particles. – Springer Series in Optical Sciences, 2005 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.springerlink.com/content/j75258113x74r713/fulltext.pdf>, св. Яз. англ. (дата обращения 26.09.2011).
2. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование: Пер. с англ. – М: Мир, 1987. – 510 с.
3. Althausen D., Muller D., Ansmann A., Wandinger U., Hube H., Clauer E., Zorner S. Scanning 6-wavelength 11-channel aerosol lidar // J. Atmos. and Oceanic Technol. – 2000. – V. 17. – P. 1469–1482.

**Волков Николай Николаевич**

– Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК), аспирант, nn-volkov@yandex.ru