

### **Лидарные исследования аэрозольной атмосферы фемтосекундными импульсами**

Г.Г. Матвиенко, В.К. Ошлаков, А.Я. Суханов, П.А. Бабушкин, А.Н. Иглакова

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (ИОА СО РАН) 634055, Россия, г. Томск, площадь Академика Зуева, 1. matvienko@iao.ru*

*В докладе представлен краткий обзор методов лазерного зондирования атмосферы, в том числе - с использованием фемтосекундных импульсов. Обсуждаются результаты экспериментов по зондированию искусственных аэрозольных образований и решению обратных задач фемтосекундной атмосферной оптики с использованием методов Монте-Карло и генетических алгоритмов.*

*The report presents a brief review of the methods of laser sounding of the atmosphere, including - using femtosecond pulses. The results of experiments to probe artificial aerosol formations and to solve the inverse problems of femtosecond atmospheric optics using Monte Carlo methods and genetic algorithms are discussed.*

В настоящее время методы лазерного зондирования основываются на процессах, имеющих высокие значения сечений рассеяния, поглощения, флуоресценции и т.п. – показателей доли энергии, изъятой из зондирующего импульса средой распространения в процессе взаимодействия [1-3]. Создаются лидары, основными информационными признаками, в которых являются: рэлеевское рассеяние, рассеяние Ми, спонтанное, вынужденное комбинационное и резонансное рассеяние, флуоресценция и резонансная флуоресценция, поглощения атмосферных газов, а также дифференциальное поглощение и рассеяние. Разработаны методы, использующие флуктуации амплитуды и фазы волны, обусловленные турбулентностью атмосферы, доплеровское и столкновительное уширение линий, доплеровский сдвиг частоты излучения при рассеянии на движущихся неоднородностях.

В числе задач, в которых реализованы алгоритмы восстановления параметров атмосферы с использованием данных лазерного зондирования (обратные задачи) [4]:

- определение компонентов комплексного показателя преломления частиц аэрозоля;
- определение спектров размеров и концентрации частиц аэрозолей при использовании измерений эхо-сигналов лазерного зондирования под разными углами, а также эффектов поляризации;
- восстановление профилей влажности, озона и других газов атмосферы методом дифференциального поглощения. В случае зондирования влажности и озона имеется в виду существенное увеличение дальности и точности зондирования;
- организация мониторинга атмосферы с целью детального исследования методами дистанционного лазерного зондирования процессов ее загрязнения продуктами индустриальной деятельности человека.

Исторически, зондирование атмосферы осуществляется монохроматическими импульсами наносекундной длительности. При выборе длительности лазерного излучения оказывает влияние известная проблема: увеличение дальности зондирования требует увеличения энергии, а улучшение пространственного разрешения – требует уменьшения длительности зондирующего импульса. Одновременное выполнение этих требований влечёт увеличение мощности импульса. Сочетание высокой мощности с заданным поперечным сечением импульса увеличивает интенсивность, которую, с

одной стороны, ограничивает лучевая стойкость оптических элементов в приемо-передающем тракте – зеркал, линз и т.п., с другой стороны - высокая интенсивность вызывает оптический пробой атмосферы, что снижает дальность зондирования. Следовательно, для уменьшения интенсивности необходимо изменять или энергию, или сечение, или длительность импульса, или всё сразу.

Разнообразие химического состава атмосферы и веществ её загрязняющих требует генерации излучения в широком спектральном диапазоне. Эта задача технически решалась в лидарах либо с помощью набора из нескольких лазерных излучателей, либо использованием лазеров с перестройкой частоты. Например, с целью повышения эффективности и получения достоверной информации лидарных наблюдений из космоса, производится наземный контроль состояния загрязнения атмосферы и подстилающей поверхности на базе данных лидарного зондирования атмосферы с помощью многоспектральных лазерных комплексов. [ 5 ].

В связи с развитием лазерной техники генерации сверхкоротких импульсов (СКИ) получили развитие методы и техника зондирования атмосферы мощными фемтосекундными импульсами. При распространении в атмосфере СКИ проявляются как пространственно-временные нелинейные эффекты - дисперсионное расплывание, самофокусировка и рефокусировка, так и связанные с ними процессы филаментации, вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР), многофотонного поглощения, генерации плазмы, генерации суперконтинуума (СК), генерации высших и низших гармоник, генерации сверхизлучения [6-8].

Как правило, при зондировании атмосферы фемтосекундными импульсами, мощность импульсов многократно превышает критическую. В результате самофокусировки уменьшается сечение импульса, следовательно, повышается интенсивность. Если распределение энергии (под огибающей импульса) одномодальное, то на оси (на «острие») импульса формируется плазма за счёт ионизации кислорода и азота (эффект оптического пробоя). Набегающий импульс обтекает плазменное образование, взаимодействует с ним по известным физическим законам, включая и рассеяние, и волновое взаимодействие (дифракцию). В сечении импульса формируется кольцевая структура, в распределении спектральной энергии наблюдается коническая эмиссия суперконтинуума (СК) [9 ].

Влияние на режим самофокусировки оказывает и присущее сверхкоротким импульсам свойство «широкоспектральности»: фактически мы имеем дело с волновыми пакетами, для которых характерно проявление зависимости длительности импульса от расстояния.

Уже первые шаги по применению фемтосекундного лидара показали, что при зондировании излучением тераваттного фемтосекундного Ti:Sapphire лазера в атмосфере формируется источник СК (так называемый «белый лазер»), позволяющий зондировать до значительных (12-15км) высот. Свечение СК в широком спектральном интервале открыло новые возможности для измерения атмосферных параметров. Перспективность использования СК послужила основой разработки ряда проектов, в том числе международных, включая мобильные варианты фемтосекундных лидаров «Teramobile» [10]. Получено экспериментальное подтверждение возможности применения фемтосекундных лидарных систем для решения вышеперечисленных задач. Проводятся такие эксперименты и в России. Эксперименты по зондированию атмосферы фемтосекундными импульсами с использованием эффекта филаментации и генерации суперконтинуума на наклонных атмосферных трассах проведены сотрудниками ИОА СО РАН и ИАПУ ДВО РАН (г. Владивосток, г. Томск). В [11] приводится описание и примеры зондирования атмосферы гигаваттными лазерными импульсами.

Использование фемтосекундных лидаров в мониторинге окружающей среды вызвало необходимость экспериментального исследования процессов взаимодействия СКИ со средой распространения и развития численных методов решения обратных задач атмосферной оптики.

Использование фемтосекундных лазеров открывает возможности по зондированию множества атмосферных параметров, основное преимущество может быть связано с перенесением энергии широко-спектрального излучения непосредственно к исследуемому объекту, что может дать возможность измерять на больших расстояниях концентрации различных веществ, их микрофизические характеристики.

В ИОА СО РАН проводятся лабораторные, трассовые и численные эксперименты по исследованию процессов взаимодействия фемтосекундных лазерных импульсов со средой распространения (воздух, вода, стекло и т.п.). Тераваттная система ИОА СО РАН, разработанная ООО "Авеста-проект" (г. Троицк), включает в себя: задающий генератор на титан-сапфире (800нм), стретчер, усилительные каскады с лазерами накачки, компрессор, а также электронику синхронизации и управления с компьютерным интерфейсом. Все компоненты расположены на одном оптическом столе для увеличения стабильности системы. Энергия на выходе Ti:Sa лазерного комплекса в диапазоне (780 ÷ 810) нм варьируется в диапазоне 10 - 100 мДж, длительность импульса излучения порядка (30 ÷ 70) фс, частота генерации 10 Гц, диаметр пучка на выходе системы 2,5см. Предусмотрены возможности выделения одиночного импульса, а также - преобразования выходного излучения на вторую гармонику (400нм). Система укомплектована необходимой контрольно-измерительной аппаратурой: автокорреляторы, спектрометры, измерители частоты, измерители энергии/мощности, профиломеры, цифровые осциллографы. Система используется как в лабораторных экспериментах (в закрытых помещениях, включая контролируемую трассу 150м), так и в открытой атмосфере (горизонтальная трасса 110м), включая эксперименты, проводимые в лидарном режиме (наклонное зондирование в свободной атмосфере). В лидарных экспериментах используются биаксиальная или коаксиальная лидарные схемы, в качестве приемо-передающей системы - телескопы системы Ньютона (или Грегори) с диаметрами основных зеркал 21 и 30 см. Регистрация либо спектрометрами Ocean Optics, либо модифицированным спектрометром на базе ДФС с временным стробированием входного сигнала.

Одновременно с развитием методов зондирования атмосферы сверхкороткими импульсами (СКИ) развиваются методы решения обратных задач ФС атмосферной оптики, среди которых можно выделить методы численного моделирования процесса распространения ФС импульсов.

Не претендуя на полноту обзора, укажем, что за последние десять лет сотрудниками ИОА СО РАН внесен достаточно большой вклад в данное направление. В работах [12-14] приведены характерные результаты экспериментальных и численных исследований распространения ФС излучения в атмосфере и в облачном аэрозоле. Рассмотрено лидарное уравнение зондирования атмосферы ФС импульсами, при этом трасса зондирования условно разделена на линейную и нелинейную части.

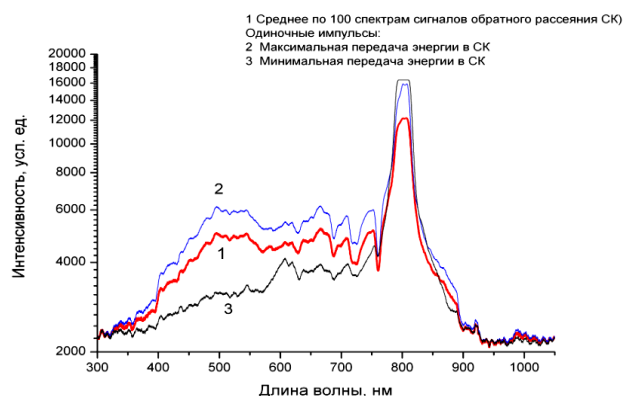
Методология моделирования процессов распространения сигнала с широким спектром и решения обратных задач оптики атмосферы применительно к ФС атмосферной оптике представлена в работах [15-17], проанализирована эффективность использования лидаров белого света для зондирования оптических и микрофизических параметров облачного аэрозоля.

Сотрудниками ИОА СО РАН и ИПФ РАН проведены эксперименты зондирования искусственных аэрозольных образований на коротких атмосферных трассах с целью использования полученных результатов в задачах восстановления функций

распределения частиц по размерам. С этой целью в натурном эксперименте использовался генератор аэрозоля (этиленгликоля) с известным узкомодальным исходным распределением.

В [18] описываются алгоритмы, разработанные на основе метода Монте-Карло и реализующие широкополосный («многоволновой») перенос излучения с учетом поглощения основными атмосферными газами и многократного (аэрозольного) рассеяния.

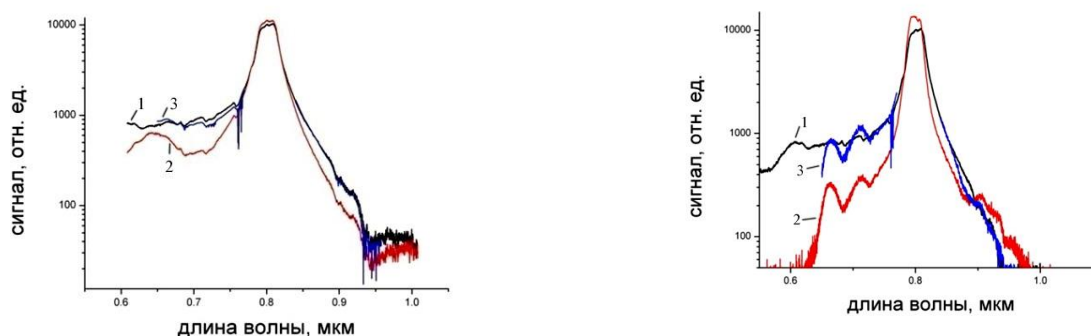
На рис. 1 приведены примеры записи спектров обратнорассеянных сигналов СК в лидарном эксперименте с искусственным аэрозолем.



**Рис. 1. Примеры спектров обратнорассеянных искусственным аэрозольным образованием сигналов СК (длина трассы 85м).**

Для моделирования использовались экспериментально полученные спектры конической эмиссии, оптические свойства тумана рассчитывались по теории Ми, учитывалась стандартная оптическая модель атмосферы Крекова. Для описания спектров распределения частиц по размерам использовалось логнормальное распределение.

В качестве примера интерпретации результатов эксперимента зондирования аэрозоля решается задача восстановления моды распределения аэрозольных частиц по размерам и спектра обратнорассеянного сигнала СК с использованием генетических алгоритмов.



**Рис. 2. Экспериментальные спектры СК, сигналов обратного рассеяния и подгонка генетическим алгоритмом.**

**1 – Спектр обратнорассеянного сигнала, 2 – спектр суперконтинуума, 3 – спектр, полученный генетическим алгоритмом путем поиска параметров функции распределения.**

Показана принципиальная возможность восстановления радиуса частиц по размерам. Также была показана возможность зондирования легких туманов с модальными радиусами частиц в пределах 0.2 – 2 мкм, и параметром логнормального распределения по ширине распределения 1.01 – 1.3.

Проведенные дополнительно численные эксперименты показали, что при выборе лидарной схемы необходимо учесть не только «внутриатмосферное» положение источника спектральных сигналов зондирования, т.е. позиционирование точки филаментации, но и спектральную зависимость форм-фактора приемного телескопа. Выполнение этих условий обеспечит более корректный учет вклада в полезный сигнал фоновой составляющей, обусловленной, в том числе, атмосферным рассеянием до объема, содержащего аэрозоль.

В заключение можно сказать, что в России успешно развиваются как экспериментальные методы зондирования окружающей среды фемтосекундными лидарными системами, так и численные методы моделирования процессов нелинейных взаимодействий оптического излучения с средой распространения. Развиваются новые методы решения обратных задач фемтосекундной атмосферной оптики.

### Литература

1. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М.; Мир1987 (1984).
2. Зуев В.Е., Зуев В.В. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы. С-Пб, Гидрометеиздат, 1992, 232 стр.
3. Kovalev V.A, Eichinger W.E. Elastic lidar. Theory, Practice, and Analysis Methods. A John Willey & sons, Inc., Publication 2004, 615 p.
4. Зуев В.Е., Наац И.Э. Обратные задачи лазерного зондирования атмосферы. Н-ск.; Наука. 1982г.
5. В.К. Донченко, Д.А. Самуленков, И.Н.Мельникова, А.С. Борейшо, А.В. Чугреев. Лазерные системы Ресурсного центра СПбГУ. Возможности, постановка задач и первые результаты. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 3. С. 122–132
6. Ахманов. С. А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. Введение в статистическую радиофизику и оптику. М.: Наука, 1981. 640с.
7. Ахманов. С. А., Выслоух В.А. Ю.Е., Чиркин А.С. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов. М.: Наука, 1988. 311с.
8. Шен И.Р. Принципы нелинейной оптики.Пер. с англ. / Под ред. С.А. Ахманова - М., Наука, Гл. ред. Физ.-мат. лит., 1989, 380стр.
9. Косарева О.Г., Панов Н.А., Кандидов В.П. Сценарий многофиламентации и генерации суперконтинуума мощного фемтосекундного лазерного импульса. // Оптика атмосфер. и океана. 2005.т. 18 №3, стр.223-231
10. J. Kasparian, J-P. Wolf. A new transient SRS analysis method of aerosols and application to a nonlinear femtosecond lidar. Opt. Com. 152 (1998) 355-360
11. Букин О.А., Бабий О.А., Голик С.С. и др. Лидарное зондирование атмосферы с использованием гигаватных лазерных импульсов фемтосекундной длительности // Квантовая электроника - 2014 - Т. 44 - № 6 - С. 563-569.]
12. Креков Г.М., Крекова М.М., Суханов А.Я. Оценка эффективности использования перспективных лидаров белого света для зондирования микрофизических параметров слоистой облачности: 1. Аналитический обзор. // Оптика атмосферы и океана. 2009. Т. 22. № 07. С. 661-670.
13. Креков Г.М., Крекова М.М., Суханов А.Я. Оценка эффективности использования перспективных лидаров белого света для зондирования микрофизических параметров слоистой облачности: 2. Параметрическая модификация итерационного метода

решения лидарного уравнения. // Оптика атмосферы и океана. 2009. Т. 22. № 08. С. 795-802.

14. Креков Г.М., Крекова М.М., Суханов А.Я. Оценка эффективности использования перспективных лидаров белого света для зондирования микрофизических параметров слоистой облачности. 3. Решение обратной задачи. // Оптика атмосферы и океана. 2009. Т. 22. № 09. С. 862-872.

15. Креков Г.М., Крекова М.М., Суханов А.Я. Оценка потенциальных возможностей широкополосного лидара для дистанционного зондирования молекулярной атмосферы. // Оптика атмосферы и океана. 2009. Т. 22. № 05. С. 482-493.

16. Фемтосекундная атмосферная оптика / [Д.В. Алексимов и др.]; под общ. ред. С.Н. Багаева, Г.Г. Матвиенко; - Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010. -238 с.

17. Креков Г.М., Суханов А.Я. Улучшенный генетический алгоритм многоволнового лидарного зондирования атмосферного аэрозоля. // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24. № 09. С. 754-758.

18. Г. Г. Матвиенко, В. К. Ошлаков, А. Н. Степанов, А. Я. Суханов, “Моделирование переноса излучения методом Монте-Карло и решение обратной задачи на основе генетического алгоритма по результатам эксперимента зондирования аэрозолей на коротких трассах с использованием фемтосекундного лазерного источника”, Квантовая электроника, 45:2 (2015), 145–152 [Quantum Electron., 45:2 (2015), 145–152].