

**ЛИДАРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДИСТАНЦИОННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ  
АТМОСФЕРЫ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ**

<sup>1,2</sup>С.М. Бобровников, <sup>1,2</sup>Е.В. Горлов, <sup>1</sup>В.И. Жарков

**LIDAR TECHNOLOGIES OF REMOTE MEASURING THE ATMOSPHERE  
PARAMETERS USING SPECTROSCOPIC EFFECTS OF INTERACTION  
BETWEEN RADIATION AND MATTER**

<sup>1,2</sup>S.M. Bobrovnikov, <sup>1,2</sup>E.V. Gorlov, <sup>1</sup>V.I. Zharkov

Излагаются принципы лазерного зондирования атмосферы с использованием спектроскопических эффектов взаимодействия излучения с веществом. Подробно рассматриваются методы дистанционного определения температуры и влажности атмосферы с использованием эффекта спонтанного комбинационного рассеяния (СКР) на молекулах атмосферного азота, кислорода и водяного пара. Рассматривается метод дистанционного газоанализа на основе эффекта СКР с использованием возбуждающего излучения «солнечно-слепой» УФ-области спектра. Рассматривается спектроскопический метод разделения лидарных откликов аэрозольного и молекулярного рассеяния для корректного решения лидарного уравнения при определении оптических характеристик атмосферы.

Излагается лидарный метод обнаружения сверхнизких концентраций азотосодержащих веществ в атмосфере на основе использования эффектов лазерной фрагментации — лазерно-индуцированной флуоресценции сложных молекул органических соединений.

Приводятся примеры технической реализации лидарных методов и результаты их использования при зондировании атмосферы и проведении калибровочных измерений.

**Ключевые слова:** лидар, комбинационное рассеяние света, атмосфера.

The lecture outlines principles of laser sounding of the atmosphere using spectroscopic effects of interaction of radiation with matter. Methods for remote detection of the atmospheric temperature and humidity using the effect of Raman scattering by molecules of atmospheric nitrogen, oxygen, and water vapor are considered in detail.

A method for remote gas analysis based on the effect of Raman scattering using the exciting radiation of the "solar-blind" UV region of the spectrum is considered. A spectroscopic method for the separation of the lidar responses from the aerosol and molecular scattering is proposed for a correct solution of the lidar equation in determining optical characteristics of the atmosphere.

The lidar method is presented for the detection of super-low concentrations of the nitrogen-containing compounds in the atmosphere using the laser fragmentation effects – the laser-induced fluorescence of complex organic molecules.

Examples of technical implementation of lidar methods and the results of their application in the atmosphere sounding and calibration measurements are given.

**Введение**

Проблема оперативного контроля параметров окружающей среды в наши дни является достаточно актуальной. Необходимость получения экспресс информации о температуре за окном, о влажности воздуха на улице в связи с опасностью возникновения гололедицы ощущают миллионы людей каждое утро. Другие виды параметров окружающей среды и атмосферы больше интересуют специалистов по экологии, метеорологии и безопасности; работников авиации, транспорта, военных, медиков, ученых и т. д., но степень их интереса и необходимый им объем информации по истине огромны.

Проблема сбора, обработки и хранения информации всегда волновала специалистов, обязанных решать конкретные хозяйственные или служебные задачи. Еще совсем недавно данные метеорологических наблюдений сетевых метеостанций заносились в журнал на бумажный носитель, и передавались в Гидрометцентр по радио с помощью азбуки Морзе, со скоростью несколько бит/сек. И это была огромная ежедневная, рутинная работа, отвлекавшая много сил и времени. Информационно-коммуникационная революция, свидетелями которой мы являемся, перевернула все представления об объемах хранения и скорости передачи информации. Сейчас практически каждый обладатель смартфона может принять или передать несколько Гбит информации со скоростью сотни Мбит/сек. При этом идет бурное разви-

тие гигантских информационных сетей, превращающихся постепенно в некую глобальную нейронную сеть. Понятно, что информационная революция вызвана огромным, постоянно растущим спросом на продукты информационных технологий, поддерживаемым миллиардными инвестициями.

Однако в системе глобальной информатизации есть слабое звено – это механизм сбора информации, ключевым элементом которого являются первичные сенсоры – источники исходных данных. Развитие этого сегмента информационной технологии продолжает сдерживаться сложностью физических и технических проблем, лежащих в основе этой области знания.

Например, совершенно очевидно, что при современном уровне развития вычислительной техники в условиях существования глобальных информационных систем, прогноз погоды мог бы быть гораздо точнее, если бы массив исходных данных о температуре, давлении, влажности и скорости ветра был бы более полным. При этом речь не идет об измерениях этих параметров в точке (или сети точек) на поверхности земли, а речь идет об оперативном получении информации о пространственно-временном распределении этих параметров атмосферы, по крайней мере, до высот 10–15 км. Именно в этом слое атмосферы происходят основные процессы погодообразования. И для решения этой задачи уже не подходят системы локальных сенсоров, объеди-

ненных в разветвленные сети. Здесь необходим принципиально иной подход, основанный на принципе дистанционных, пространственно разрешенных измерений.

Существуют более интеллектуальные, отличающиеся от лобового решения варианты, в которых атрибут дистанционности уже не связан просто с проведением многократных контактных точечных измерений, а является неотъемлемой принадлежностью метода. Системами, отвечающими такому критерию, являются лидары, чей принцип действия основан на анализе особенностей взаимодействия с веществом распространяющегося вдоль трассы зондирования электромагнитного излучения. Пространственное разрешение в лидарах, также как и в радиолокации осуществляется за счет использования импульсного излучения.

Развивая и применяя лидарный подход, можно предложить методы дистанционного оперативного измерения различных характеристик атмосферы, построенные на использовании физических связей между параметрами среды и оптическими проявлениями взаимодействия излучения с веществом.

Именно задача поиска наилучшей связи между параметрами окружающей среды и характеристиками излучения является главной при разработке того или иного лидарного метода. При этом всегда неизбежно возникает и вопрос практической реализуемости физического принципа в измерительном устройстве. Разнообразные задачи дистанционной диагностики атмосферы требуют поиска специальных путей использования физического принципа и способов практической реализации метода. В каждом конкретном случае разработчику-исследователю приходится решать специальную задачу разработки аппаратуры и методики проведения измерений.

Однако, поскольку речь идет о лидарных технологиях, основанных на использовании различных эффектов взаимодействия излучения с веществом, то здесь возможно осуществление некоторого единого подхода, связанного со спектроскопическими проявлениями оптических взаимодействий. Особый интерес здесь вызывает некоторый класс оптических явлений, проявляющихся в возникновении излучения (эмиссии) в ответ на узкополосное воздействие лазерного импульса. Этот класс явлений отличается сложностью условий наблюдения, требующих применения тонких экспериментальных технологий, но при этом, как правило, оптический отклик несет адекватную информацию об объекте взаимодействия и требуется минимум усилий по интерпретации данных зондирования. К таким явлениям, прежде всего, относятся явления спонтанного комбинационного рассеяния и флуоресценции и различные их модификации. Релеевское и Ми рассеяние также могут использоваться в спектроскопических лидарных технологиях как носители дополнительной информации.

В рамках предложенного подхода оказалось возможным объединить целое семейство лидарных методов дистанционной диагностики атмосферы, позволяющих решать широкий класс задач дистанционной диагностики состояния окружающей среды.

Это задачи дистанционного определения вертикального распределения температуры и влажности атмосферы, необходимого для прогнозирования погоды и исследований в области физики атмосферы. Это и корректное измерение коэффициентов рассеяния по любому выбранному направлению, необходимое как для определения условий видимости в атмосфере, так и при проведении исследований в области физики аэрозолей. Большое значение имеет развитие дистанционных методов обеспечения безопасности. В последнее время эта проблема становится все более актуальной в связи с распространением международного терроризма. Здесь спектроскопический подход позволяет осуществлять непрерывный дистанционный скрытый контроль состава воздуха и оперативно оповещать об опасности появления отравляющих веществ в атмосфере.

Особый интерес в последнее время вызывает проблема дистанционного обнаружения взрывчатых веществ и взрывных устройств. Здесь лидарный спектроскопический подход позволяет добиться чувствительности по парам тротила не хуже, чем чувствительность собачьего носа, осуществляя при этом дистанционный досмотр объекта на безопасном расстоянии.

Применение единого подхода, в рамках спектроскопической идеологии, позволило найти общие решения для перечисленных выше задач развития лидарных методов диагностики атмосферы, применить общую техническую политику при разработке семейства лидарных систем, добиваясь при этом практических результатов.

#### **Принцип дистанционного определения параметров атмосферы на основе анализа оптических спектров лидарного отклика**

В 2010 г. исполнилось 50 лет со дня создания лазера. Это событие широко отмечалось научной общественностью всего мира. Российская Академия наук посвятила этому событию специальное общее собрание. И действительно за эти годы лазеры нашли широкое применение в различных областях науки и техники. На сегодняшний день существует ряд оптических методов зондирования с использованием лазеров, на основе которых могут быть разработаны спектроскопические методики дистанционного обнаружения атомов и молекул, входящих в состав атмосферы. Использование тонких спектроскопических эффектов с применением лазеров позволяет осуществить дистанционные измерения таких важных характеристик атмосферы как температура, влажность, скорость и направление ветра. Определить условия видимости в атмосфере в любом направлении. Определить уровень аэрозольного загрязнения и дистанционно оценить состав аэрозольных частиц. Использование лазеров для дистанционного зондирования в первую очередь обусловлено их способностью излучать очень короткие, мощные импульсы когерентного излучения. Так же как и в радиолокации, это обеспечивает пространственное разрешение в измерениях с помощью лазерных локаторов, или лидаров (аббревиатура английских слов Light Detection and Ranging), который является оптическим аналогом радиолокатора.

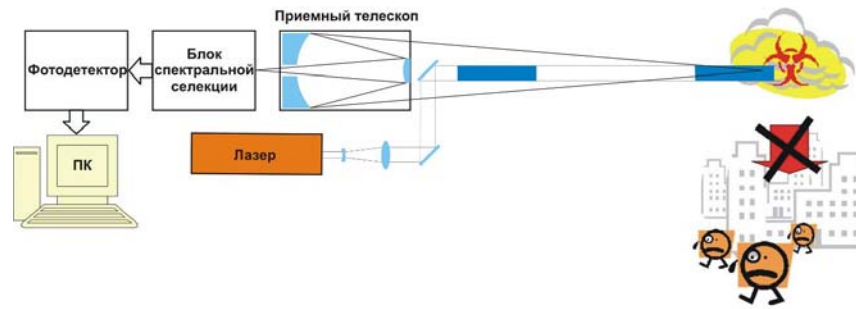


Рис. 1. Принципиальная схема лидара.

Функциональные элементы и принцип работы большинства лидаров показаны на рис. 1. Короткий импульс оптической энергии, излучаемой лазером, передается через передающий оптический блок в направлении зондируемого объекта. Оптический блок лазерного передатчика может осуществлять коллимацию или фокусировку пучка, а так же проводить необходимую пространственную или спектральную фильтрацию излучения.

Приемная оптическая система предназначена для сбора рассеянного «назад» излучения и формирования «поля зрения», позволяющего отсечь оптические помехи фонового излучения.

Излучение, собранное приемной оптической системой, прежде чем попасть в блок детектирования, проходит через спектроанализатор. Этот лидарный блок служит для выделения спектральных измерительных интервалов, и подавления линии несмещенного рассеяния. Спектроанализатор может представлять собой дифракционный или «фильтровый» (набор узкополосных фильтров), полихроматор.

Выбор типа и количества фотодетекторов определяется характером решаемой спектроскопической задачи.

### Спектральное представление лидарного уравнения

Практически одновременно с появлением первых, пригодных для практической эксплуатации лазерных источников излучения, были сделаны попытки создания экспериментальных лидарных установок для зондирования атмосферы. Примерно в тоже время начала развиваться и теория лазерного зондирования. Прежде всего было выведено лидарное уравнение, которое связывает интенсивность оптического сигнала на приемной апертуре лидара с параметрами аппаратуры и характеристиками атмосферы. Запишем лидарное уравнение в удобной для анализа и достаточно общей форме

$$n(r, \nu) = \frac{W f \pi D^2}{h \nu_0 4r^2} K_{TRD} G(r) \beta(\nu, r) \times \exp\left(-\int_0^r (\alpha(\nu_0, x) + \alpha(\nu, x)) dx\right), \quad (1)$$

где  $r = \frac{ct}{2}$  – расстояние до рассеивающего объема;  $c$  – скорость света;  $W$  – энергия в импульсе;  $h$  – постоянная

Планка;  $\nu_0$  – частота лазерного излучения;  $K$  – коэффициент пропускания передающей и приемной оптики;  $\eta$  – квантовая эффективность фотоприемника;  $D$  – диаметр приемного телескопа;  $G(r)$  – геометрический фактор, учитывающий перекрытие полей зрения приемной и передающей оптики;  $\beta(\nu, r)$  – профиль объемного коэффициента рассеяния назад на частоте  $\nu$ ;  $\frac{ct}{2}$  – определяет длину рассеивающего объема вдоль трассы зондирования;  $\alpha(\nu, x)$  – профиль коэффициента ослабления атмосферы, для частоты  $\nu$ .

Уравнение (1.1) описывает мгновенную частоту фотоотсчетов лидарного сигнала в момент времени  $t$ , прошедшего с расстояния  $r$  на частоте  $\nu$ . Как видно из выражения (1), частотная зависимость лидарного сигнала содержится в явном виде в коэффициенте обратного рассеяния атмосферы –  $\beta(r, \nu)$  и в коэффициенте ослабления  $\alpha(\nu, r)$ .

Очевидно, что уравнение (1) содержит два неизвестных параметра атмосферы  $\beta(r, \nu)$  и  $\alpha(\nu, r)$  и не может быть решено без введения некоторых дополнительных условий, определяющих связь между этими неизвестными. Один из способов разрешения этого противоречия – использование спектральной зависимости.

### Связь спектральных компонентов лидарного сигнала с параметрами атмосферы

Можно использовать различные спектральные признаки для разделения молекулярного и аэрозольного компонентов рассеяния.

Такое разделение, в частности, позволяет решить задачу доопределения лидарного уравнения для случая решения задачи дистанционного определения оптических характеристик атмосферы.

Этот прием позволяет корректно решить лидарное уравнение относительно коэффициентов рассеяния и определить лидарное отношение – важную характеристику ансамбля аэрозольных частиц.

На рис. 2 приведен пример оптического спектра лидарного отклика чистой атмосферы при возбуждении на длине волны 355 нм (третья гармоника NdYAG лазера). Рассмотрим кратко возможности использования особенностей спектра для дистанционной диагностики атмосферы.

В левой части рисунка видна линия несмещенного рассеяния, обусловленная эффектом упругого рассеяния

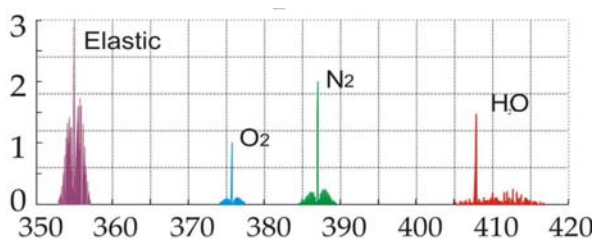


Рис. 2. Оптический спектр лидарного отклика чистой атмосферы при возбуждении на длине волны 355 нм.

на молекулах и аэрозолях атмосферы. Спектр лидарного отклика при рассеянии на молекулах уширен за счет эффекта Доплера и отражает Максвелловское распределение скоростей теплового движения молекул. По ширине контура линии молекулярного рассеяния можно измерять температуру атмосферы. Абсолютная величина смещения линии несмещенного рассеяния относительно линии возбуждающего излучения позволяет определить радиальную скорость направленного движения рассеивающей среды, т. е. скорость ветра. Как измерение температуры, так и скорости ветра по эффекту Доплера требуют применения прецизионных технологий спектроскопии сверхвысокого разрешения.

Слева и справа от линии несмещенного рассеяния расположились полосы чисто вращательных спектров спонтанного комбинационного рассеяния, обусловленные рассеянием на вращающихся молекулах. Поскольку энергия вращательного кванта молекулы сравнима с величиной теплового кванта  $kT$ , при атмосферных температурах, распределение населенностей вращательных уровней молекул в условиях термодинамического равновесия существенным образом зависит от температуры. Это обстоятельство позволяет построить метод дистанционного определения температуры атмосферы по измерению отношения интенсивностей двух участков чисто вращательных спектров СКР на молекулах азота и кислорода. При этом реализация метода не требует применения спектроскопических технологий сверхвысокого разрешения. Далее в спектре видны колебательно-вращательные полосы СКР на молекулах основных газовых компонентов атмосферы – кислорода, азота и водяного пара. Эти спектральные компоненты могут быть использованы для определения содержания водяного пара в атмосфере по отношению интенсивностей  $Q$ -ветвей спектров СКР на молекулах водяного пара и атмосферного азота. Этот метод позволяет дистанционно определять вертикальное распределение абсолютной влажности в атмосфере. И наконец, при определенных усилиях по повышению чувствительности аппаратуры в спектре лидарных откликов могут быть обнаружены компоненты, обу-

словленные спектральными проявлениями примесей различного происхождения, присутствующие в малых и сверхмалых концентрациях. Это могут быть выбросы побочных продуктов промышленного производства, специальные химические и биологические агенты, пары взрывчатых и других опасных веществ. Положение линий или полос в спектре лидарных откликов для этих веществ будет нести информацию о химическом строении молекулы вещества и позволит провести идентификацию его типа. Очевидно, что проблема обнаружения низких и сверхнизких концентраций в атмосфере чрезвычайно актуальна.

Основой использования оптических методов для дистанционной диагностики состояния окружающей среды является взаимодействие электромагнитного излучения с атомами и молекулами. При этом информация об исследуемых компонентах извлекается из наблюдений таких видов взаимодействия излучения с веществом, как рассеяние, поглощение и испускание (флуоресценция), на базе которых разрабатывается большинство аналитических методов.

В самом общем случае эффекты взаимодействия могут быть разделены на две большие группы – линейные и нелинейные. Линейные эффекты считаются классической формой взаимодействия, не требующей создания особых условий. Нелинейные же эффекты обратили на себя внимание с появлением лазеров и в наше время переживают второе рождение с приходом в экспериментальную практику фемтосекундных лазерных импульсов. Безусловно, фемтосекундная оптика атмосферы ждет своего открытия, однако эта тема выходит за пределы настоящего рассмотрения. Имеющийся опыт использования нелинейных эффектов в лазерном зондировании, безусловно, можно охарактеризовать как несущий новизну и перспективу особенно в области визуализации процессов горения и истечения газовых струй. Однако, как правило, введение среды в нелинейное состояние сопровождается появлением индуцированных шумов, которые чаще всего не позволяют добиться высокой чувствительности и прецизионной точности, несмотря на высокую эффективность взаимодействия.

Использование линейных эффектов в лазерном зондировании при соблюдении определенных условий, как правило, позволяет приблизиться к теоретическому пределу по измерительным характеристикам.

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия