

В.Е. Зуев

ОПТИКА АТМОСФЕРЫ. ИТОГИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Появление лазеров с их уникальными свойствами дало толчок стремительному развитию оптики атмосферы в последнюю четверть века. Многообразные применения лазеров в системах, работающих в атмосфере, таких, как системы связи, локации, дальнометрирования, навигации, и многих других, а также широкие возможности их использования для зондирования самой атмосферы потребовали пересмотра практически всех основ «классической» и создания новой «лазерной» оптики атмосферы.

Лавинообразное накопление новых знаний в этой области, практическая значимость задач оптики атмосферы и широкое использование комплексного подхода к их решению, успехи, достигнутые в использовании вычислительной техники для обработки результатов атмосферно-оптического эксперимента в реальном масштабе времени, привели к объективной необходимости издания нового ежемесячного научно-теоретического журнала АН СССР «Оптика атмосферы».

Цель настоящей вступительной статьи первого номера журнала — охарактеризовать современное состояние и основные направления развития комплексной проблемы «Оптика атмосферы». Главная задача статьи — ознакомить будущих авторов и читателей с тем кругом вопросов, которые планируются обсуждать в журнале.

Спектроскопия атмосферы

Комплексная проблема спектроскопии атмосферы включает в себя развитие теории спектров поглощения атмосферных газов, разработку спектрометров высокого и сверхвысокого разрешения и получение с их помощью спектров атмосферных газов, не искаженных аппаратными функциями приборов. Совокупное использование экспериментальных и теоретических данных о параметрах спектральных линий составляет важное прикладное направление спектроскопии атмосферы. Основные приложения этого направления связаны с количественной оценкой поглощенной атмосферными газами энергии оптической волны и обеспечением соответствующей информацией спектроскопических методов зондирования различных атмосферных параметров.

Основные итоги развития теории спектров поглощения атмосферных газов, в том числе загрязняющих ее компонентов, сводятся к следующему.

1. В области теории спектров легких нежестких молекул создан новый метод описания вращательной структуры этого класса молекул, позволяющий эффективно находить вращательные гамилтонианы с улучшенными свойствами сходимости. Развитые на основе этого подхода теоретические модели дают возможность:

— на 1–2 порядка улучшить точность описания вращательных и колебательно-вращательных спектров ряда легких нежестких молекул, таких как H_2O , CH_2 , за счет правильной асимптотики и учета основных вкладов от центробежного искажения, причем улучшение точности предсказания энергий уровней, не участвующих в обработке, достигает 3–4 порядков (по сумме квадрата отклонений);

— поставить обратную задачу об определении потенциальной функции нежестких молекул, что дает возможность восстановить не только спектроскопические константы состояний, но и частоты экспериментально наблюдаемых переходов.

2. В области описания вращательной структуры возбужденных вырожденных и резонирующих колебательных состояний молекул развита теория редукции эффективных гамилтонианов для многократно вырожденных изолированных и полиад резонирующих уровней, позволяющая сформулировать однозначные теоретические модели для решения обратной задачи. Указанная теория применена к описанию экспериментальных спектров ряда молекул, полученных в последнее время на лучших спектрометрах. В качестве блестящего результата этой, теории следует назвать описание фурье-спектров с экспериментальной точностью их получения порядка $7 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}$.

3. В области теории далеких крыльев спектральных линий, развитой на основе использования метода полуклассического представления для описания взаимодействия существенно квантовой системы с системой, допускающей классическое описание, получены принципиально новые результаты с точки зре-

ния физической интерпретации коэффициентов сплошного поглощения в окнах прозрачности атмосферы в ИК-области спектра, обусловленного далекими крыльями линий полос водяного пара.

Одним из важных практических следствий анализа задачи о крыльях спектральных линий является возможность четкой постановки обратной спектроскопической задачи: измерения коэффициента поглощения в крыльях линий и полос позволяют восстанавливать классический потенциал межмолекулярного взаимодействия. Существенно, что в отличие от большинства методов здесь не обязательно задавать форму потенциала. Кроме того, потенциал восстанавливается для малых межмолекулярных расстояний с учетом вида температурной зависимости.

Обобщение теории на случай поглощения в крыле линии интенсивного лазерного излучения позволило показать существование нового нелинейного спектроскопического эффекта «просветления» крыла. Физической причиной эффекта является зависимость классического потенциала от интенсивности излучения.

Бурное развитие спектроскопии атмосферных газов связано с созданием принципиально новой техники спектроскопии высокого и сверхвысокого разрешения, обеспечивающей регистрацию полностью разрешенных и не искаженных аппаратными функциями приборов колебательно-вращательных спектров атмосферных газов. К указанным техническим средствам спектроскопии относятся уникальные фурье-спектрометры, лазерные спектрометры, внутривибрационные, оптико-акустические и флуоресцентные лазерные спектрометры.

Использование разработанных спектрометров позволило впервые зарегистрировать десятки колебательно-вращательных полос атмосферных газов, много тысяч линий поглощения и провести их идентификацию. Получены фундаментальные результаты исследований контура спектральных линий при различных физических условиях. Наконец, для практических приложений получены надежные высокоточные данные о параметрах линий, коэффициентах и функциях поглощения, столь необходимые для оценки количественных потерь энергии оптической волны в атмосфере за счет ее поглощения атмосферными газами, а также для решения задач, связанных со спектроскопическими методами зондирования атмосферы.

Говоря о перспективах проблем спектроскопии атмосферы, следует подчеркнуть необходимость дальнейшего развития теории колебательно-вращательных спектров молекул и ее применения к описанию атмосферных газов, в особенности многочисленных загрязнителей атмосферы, и тех, что присутствуют в планетарном масштабе, и тех, что являются специфическими для различных производств.

И в теории, и в эксперименте должны найти существенно большее отражение проблемы нелинейной спектроскопии атмосферы. При исследовании спектров атмосферных газов методами лазерной спектроскопии высокого и сверхвысокого разрешения требуется поиск новых методов, которые бы обеспечили перекрытие всего оптического диапазона длин волн. Направление, связанное с синтезом методами нелинейной оптики таких линий лазерной генерации, центры которых совпадают с линиями поглощения зондируемых газов, должно стать наиболее перспективным для спектроскопических методов зондирования атмосферы.

Оптика атмосферного аэрозоля

Атмосферный аэрозоль — наиболее изменчивая компонента атмосферы. Все микрофизические характеристики этой компоненты (концентрация частиц, спектры размеров частиц, их форма и комплексный показатель преломления) варьируют в пространстве и времени в весьма широких пределах. Соответственно изменяются оптические характеристики как отдельных частиц, так и их ансамблей (коэффициенты поглощения, рассеяния, ослабления, индикатрисы рассеяния, поляризационные параметры).

К настоящему времени получены значительные массивы данных о микрофизических и оптических характеристиках аэрозоля, и на их основе созданы соответствующие модели атмосферы. Однако здесь принципиально важным является комплексное решение проблем оптики атмосферы, когда одним из конечных результатов следует ожидать детальное исследование оптической погоды, в формировании которой играет решающее значение аэрозоль.

Изучение оптики аэрозоля с учетом его предыстории, динамического развития и трансформации будет представлять все больший интерес. Особое место в изучении оптики аэрозоля призваны сыграть многоспектральные методы космического зондирования как пассивные, так и активные, и прежде всего лидарные. Для достижения успехов в этом генеральном направлении потребуются создать целую сеть станций подспутникового зондирования на земле, самолетных и корабельных бортах. При указанном подходе сразу же решается задача зондирования промышленных аэрозолей, начиная от источников их выбросов и далее по всему шлейфу их распространения. Только тогда на количественную основу будет поставлен вопрос о трансграничных переносах загрязнений в атмосфере.

Этот же подход одновременно позволит решить одну из сложнейших проблем оптики атмосферы — разработку методов и технических средств устранения искажающего влияния атмосферы на любую информацию, передаваемую оптическими волнами.

Отдельно следует подчеркнуть большое значение комплексных исследований промышленного аэрозоля с учетом его многообразных взаимодействий с аэрозолем природного происхождения, с га-

зовыми компонентами в атмосфере в различных пространственных и временных масштабах. Это направление пока находится в самой начальной стадии своего развития.

Еще одна крупная проблема оптики аэрозоля, в решении которой уже достигнуты определенные успехи, а именно проблема нелинейного взаимодействия оптической волны с аэрозольным ансамблем, должна получить новое развитие в связи с успехами в разработке мощных источников излучения и средств контроля среды, а также благодаря широкому применению средств автоматизации.

Оптика турбулентной атмосферы

Земная атмосфера случайным образом изменяет амплитуду и фазу распространяющейся в ней оптической волны, вызывая тем самым соответствующие искажения как параметров самой волны, так и переносимой ею информации. Все это обуславливает постоянный интерес ученых и практиков к комплексной проблеме «Оптика турбулентной атмосферы».

Благодаря усилиям советских и зарубежных ученых в последние два с половиной десятилетия решение указанной проблемы существенно продвинуто. Разработанная теория позволяет проводить глубокий статистический анализ лазерного излучения в турбулентной атмосфере с учетом многократного рассеяния и пространственной ограниченности световых пучков, количественно описывая имеющиеся экспериментальные результаты в широком диапазоне варьирования турбулентных условий распространения и дифракционных параметров приемной и передающей оптических систем.

Определенные результаты достигнуты в исследованиях распространения лазерного излучения при тепловом самовоздействии в турбулентной атмосфере. Установлено, например, что турбулентность атмосферы оказывает демпфирующее действие на тепловую дефокусировку и ветровую рефракцию энергетического центра тяжести оптического пучка. Однако увеличение мощности источника в конечном счете ведет к ухудшению пространственной когерентности и усилению флуктуации интенсивности распространяющегося излучения по сравнению со случаем отсутствия самовоздействия.

Исследования распространения волн в случайно-неоднородных средах на локационных трассах, проведенные в последние годы, позволили установить ряд принципиально новых закономерностей, обусловленных корреляцией встречных волн.

Перечислим кратко возможные направления дальнейших исследований. Это изучение распространения лазерного излучения при тепловом самовоздействии в атмосфере; учет влияния типа рассеивающей поверхности на характеристики отраженного сигнала. Остается нерешенной задача исследования флуктуации поля отраженных волн на статистически неоднородных атмосферных трассах, что приобретает особую актуальность в связи с развитием космических систем мониторинга земной поверхности в интересах народного хозяйства. Актуальными являются исследования рассеяния волн естественным аэрозолем в условиях турбулентной атмосферы, что даст возможность создать лидарные методы зондирования атмосферной турбулентности.

Применение в системах оптической локации лазерных источников большой мощности позволяет повысить их потенциал. Вместе с тем появление нелинейных искажений эхо-сигналов становится фактором, который наряду с турбулентными флуктуациями существенно затрудняет их интерпретацию. Поэтому возникает необходимость совместного учета влияния турбулентности атмосферы и нелинейных эффектов на характеристики отраженного излучения и задача о флуктуациях волн, рассеянных на нелинейных искусственных образованиях в турбулентной атмосфере.

Представляются актуальными исследования атмосферы как случайно-неоднородной рефракционной среды, оказывающей искажающее влияние на передачу информации в оптическом диапазоне длин волн на трассах Земля — Космос; решение обратной задачи рефракции с учетом случайных изменений показателя преломления воздуха. Создание сети станций, обеспечивающих глобальную топографическую реконструкцию трехмерного поля показателя преломления атмосферы, развитие на ее базе томографической методологии восстановления трехмерных полей других параметров атмосферы (влажности, температуры, концентрации аэрозоля и т. д.) могли бы оказаться здесь решающими.

Оптическая рефракция в атмосфере

Явление оптической рефракции, приводящее к изменению распространения оптических волн в неоднородной атмосфере, в последние два десятилетия получило новый импульс своего развития, обусловленный новыми, значительно более жесткими требованиями к точности определения рефракционных поправок. Этому существенно способствовало применение лазеров в различных системах, работающих через атмосферу.

К основным новым результатам по исследованию оптической рефракции следует отнести разработку ряда методов определения углов рефракции на протяженных горизонтальных трассах, новых алгоритмов определения рефракционных углов на наклонных трассах, разработку региональных моделей рефракции атмосферы.

Дальнейшие перспективы развития рассматриваемой проблемы связаны с разработкой и применением методов оперативной диагностики определения профилей плотности, давления, температуры и

влажности в требуемом направлении распространения оптической волны с целью определения рефракционных поправок при любых состояниях атмосферы в реальном масштабе времени.

На современном этапе развития науки и техники решение задачи, когда требования точности дальнометрирования характеризуются величиной порядка сантиметров, а рефракционные поправки могут достигать дециметров и метров, наиболее доступно лишь с привлечением методов лазерного дистанционного зондирования атмосферных параметров, о чем речь пойдет ниже.

Обратные задачи оптики атмосферы

Рассмотренные разделы оптики атмосферы являются ее прямыми задачами, они исследуют влияние атмосферы на параметры распространяющейся в ней оптической волны при всевозможных физических условиях и по различным направлениям. Успешное решение прямых задач, кроме непосредственного назначения, одновременно создает и прочный фундамент для решения обратных задач. В свою очередь, без успешного решения последних мы практически лишены возможности получения количественной информации о параметрах атмосферы и динамике их изменений с помощью наиболее эффективных методов дистанционного зондирования.

Таким образом, совокупное решение прямых и обратных задач оптики атмосферы является основным содержанием современной атмосферной оптики, ее методологической основой.

Подавляющее число обратных задач оптики атмосферы относится к классу некорректных задач, в фундаментальное решение которых значительный вклад внесла советская научная школа академика А.Н. Тихонова. Конкретные алгоритмы решения этих задач применительно к методам оптического зондирования и созданы на этой основе.

К числу важнейших достижений, обусловленных успехами в решении обратных задач, следует отнести разработку и практическое использование метода многочастотного лазерного зондирования микрофизических характеристик аэрозолей (концентрация, распределение по размерам полидисперсных ансамблей частиц); разработку методов многоуглового и поляризационного зондирования аэрозолей; создание и применение алгоритмов зондирования газовых компонентов атмосферы по дифференциальной методике и некоторые другие.

Говоря о проблемах решения обратных задач атмосферной оптики, прежде всего, следует подчеркнуть приоритетное направление, связанное с методами дистанционного зондирования различных атмосферных параметров из космоса с учетом неоднородности их полей во времени и пространстве в глобальном масштабе, а также микромасштабных неоднородностей, включая неправильную форму частиц.

Оптическое зондирование атмосферы

Методы оптического зондирования атмосферных параметров могут быть разделены, с одной стороны, на активные и пассивные, с другой стороны — на локальные и дистанционные. У каждого из таких методов, естественно, имеются свои плюсы и минусы, и только совокупное использование этих методов принесет максимальный эффект в исследовании атмосферы. Тем не менее следует подчеркнуть основополагающую роль активных дистанционных методов лазерного зондирования, обусловленную их возможностями получать оперативную информацию из огромных объемов среды, к тому же с необыкновенно высоким пространственным и временным разрешением.

Успешное развитие наиболее перспективных методов дистанционного лазерного зондирования атмосферных параметров зависит: 1) от решения соответствующих прямых и обратных задач; 2) от разработки сложнейшей техники — лидаров; 3) от автоматизации процессов зондирования и обработки их результатов в реальном масштабе времени. Первый из этих вопросов мы уже рассмотрели. На следующих двух целесообразно остановиться отдельно. Здесь же приведем лишь наиболее крупные результаты лазерного зондирования атмосферных параметров и перечислим перспективные задачи.

К основным достижениям в области лазерного зондирования атмосферы, которые были получены благодаря использованию всех достижений и науки, и техники соответствующих направлений, следует отнести: 1) восстановление профилей микрофизических параметров аэрозолей в тропосфере и стратосфере; 2) определение профилей водяного пара по дифференциальной методике до высот 10–12 км; 3) зондирование профилей плотности и температуры на высотах 50–100 км и концентрации озона в интервале высот до 40–50 км; 4) восстановление профилей температуры в нижнем километровом слое атмосферы на основе использования явления спонтанного комбинационного рассеяния; 5) определение профилей скорости ветра и интенсивности турбулентности атмосферы в планетарном пограничном слое атмосферы; 6) дистанционный анализ атомарного состава частиц аэрозолей и окружающего их воздуха, а также высокочувствительное определение концентрации малых газовых компонент. Все эти результаты получены при наземном базировании лидаров. Достаточное распространение получило использование самолетных лидаров в зондировании профилей коэффициентов аэрозольного рассеяния как над самолетом, так и в надири.

На этой основе получена значительная совокупность фундаментальных результатов о протекающих в атмосфере процессах и явлениях. Для иллюстрации приведем лишь примеры применения уни-

кальных методов зондирования атмосферы на основе использования нелинейных эффектов. Так, в результате натуральных экспериментов установлена фундаментальная роль фонового аэрозоля в возникновении основных потерь излучений импульсных лазеров, связанных с нелинейным рассеянием света на очагах низкопорогового оптического пробоя в твердофазном аэрозоле и продуктах фрагментации частиц водного аэрозоля. Экспериментально зарегистрированы эффекты неаддитивного взаимодействия атмосферной турбулентности и тепловой нелинейности атмосферы, а также сопутствующие нелинейные процессы: генерация переменных электрического и магнитного полей, генерация акустического излучения, возникновение остаточной электропроводности и фотохемо-люминесценции в канале пучка. Обнаружен нелинейный эффект параметрического комбинационного рассеяния света на собственных частотах колебаний формы капель туманов и осадков, резонансно возбуждаемых модулированным лазерным излучением. Это явление представляет несомненный практический интерес для лазерной экспресс-диагностики микроструктуры аэрозолей, а также для селективного разрушения аэрозолей и биологических микрообъектов.

Особо следует остановиться на вопросе использования дифференциальной методики для определения средних концентраций загрязняющих газов на трассах различных протяженностей примерно от 100 м до 1–2 км. Реализованная чувствительность этого метода по нескольким десяткам загрязнителей атмосферы (прежде всего по присутствующим в планетарном масштабе) позволяет проводить определение средних концентраций на уровне их фоновых значений вплоть до миллиардных долей от содержания воздуха.

В перспективе, кроме традиционных задач повышения точности и потолка зондирования по всем направлениям, необходимо особо назвать два направления: 1) зондирование из космоса; 2) разработка и внедрение принципиально нового подхода к проблеме зондирования атмосферных параметров с наземных систем, кораблей, самолетов и из космоса с помощью лазерных систем, обеспечивающих синтез излучения с заранее заданными свойствами, которые определяются решаемыми задачами.

Оптические модели атмосферы

Важным звеном в комплексной проблеме «Оптика атмосферы» являются оптические модели атмосферы, без которых невозможно решение как прямых, так и обратных задач. Понятно, что этой задаче уделяется много внимания, и к настоящему времени разработана целая серия моделей различных оптических характеристик (коэффициентов и функций поглощения атмосферных газов, коэффициентов поглощения, рассеяния и ослабления как отдельных частиц аэрозолей, так и их статистических ансамблей, комплексных показателей преломления, компонентов матрицы рассеяния).

Указанные модели создаются или на основе соответствующих оптических измерений, или рассчитываются по определенным алгоритмам решения прямых задач оптики атмосферы из имеющихся физических моделей атмосферы (распределение температуры, общего давления, парциальных давлений газовых компонентов, микрофизических параметров аэрозольных ансамблей и др.).

Критически оценивая ситуации с моделями атмосферы, следует признать, что предстоит выполнить еще больший объем исследований, чему прежде всего будут способствовать успехи в дистанционном зондировании атмосферы космическими средствами.

Лидары и автоматизация в атмосферной оптике

К настоящему времени практически не осталось физических параметров атмосферы, по которым методами лазерного зондирования не получено хотя бы предварительных данных. При разработке лидаров использован широкий круг явлений взаимодействия лазерного излучения с атмосферой (аэрозольное, релеевское, резонансное и комбинационное рассеяние, резонансное молекулярное поглощение, флуоресценция, эффект Доплера, флуктуации сигнала, обусловленные случайными неоднородностями среды, целая серия нелинейных эффектов).

Современные лидары — сложнейшие, полностью автоматизированные комплексы аппаратуры, обеспечивающие программное управление процессом зондирования и обработку его данных в реальном масштабе времени.

Дальнейшее развитие лидарной техники связано главным образом с увеличением ее потенциала за счет использования постоянно совершенствуемых лазеров, оптики, электроники, уменьшения массогабаритных характеристик. Важной проблемой практического применения лидаров следует считать их серийное промышленное производство.

Несомненно, что автоматизация в атмосферной оптике далеко не ограничивается применением ее в лидарной технике. Сегодня генеральным направлением должна стать, если можно так выразиться, сплошная автоматизация решений всех проблем оптики атмосферы, начиная от использования компьютеров для аналитических вычислений и численного моделирования любых ее задач и кончая автоматизацией технологических процессов по созданию современных измерительных устройств, приборов, комплексов аппаратуры атмосферного назначения.

Только при указанном подходе научные исследования приводят к «лавинообразному» росту информации о взаимосвязанных подобластях исследований. Последнее приближает проблему к такому порогу сложности, за которым не вооруженный инструментом для обработки информации разум ока-

зывается не в состоянии эффективно контролировать, процесс приобретения новых знаний и их сопоставление с общепринятыми моделями.

Единственной возможностью удовлетворения потребностей в оперативном получении и обработке данных является широкое применение «компьютерной технологии», идеальная модель которой сводится к тому, что вся информация о предметной области хранится, циркулирует, преобразуется и обрабатывается на машинных носителях с использованием средств вычислительной техники. Понятно, что такая технология требует одновременного развития программных и технических средств; вычислительной техники.