

Развитие лазерных технологий в проблеме дистанционного зондирования атмосферы

Г.М. Креков, Г.Г. Матвиенко*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 16.06.2010 г.

Выполнен краткий экскурс в историю создания лазеров и развития лазерных технологий в приложении к проблеме дистанционного лазерного зондирования атмосферы. Отмечаются предпосылки открытия Института оптики атмосферы (ИОА) СО АН СССР и его роль в исследовании физических процессов распространения лазерного излучения в природных средах в целом и в развитии методологии лидарного зондирования в частности. На примере задачи лазерного зондирования атмосферного аэрозоля показана приоритетная роль специалистов ИОА в разработке эффективных методов и средств оперативного оптического контроля параметров окружающей среды. Приводятся наиболее характерные результаты, отражающие современные тенденции внедрения передовой лазерной техники, включая фемтосекундные лазеры, в перспективные приборы и методы лидарного зондирования.

Ключевые слова: лазер, дистанционное зондирование, контроль окружающей среды; laser, remote sensing, environment monitoring.

Введение

Вторая половина XX в. ознаменовалась яркими достижениями научно-технического прогресса: овладение ядерной энергией, освоение космоса, развитие радиолокационной техники, производство компьютеров. Среди этих достижений достойное место занимает создание лазеров. В основу их работы положено явление усиления электромагнитных колебаний при помощи вынужденного, индуцированного излучения атомов и молекул, которое было предсказано еще в 1917 г. Альбертом Эйнштейном при изучении им равновесия между энергией атомных систем и их излучением. Теоретические основы квантовой оптики, приведшие к созданию лазеров, были заложены в классической статье Альберта Эйнштейна «Квантовая теория излучения» [1], опубликованной в 1917 г. Введя понятия вероятностных коэффициентов поглощения, спонтанного и вынужденного электромагнитного излучения (коэффициентов Эйнштейна), он не только показал возможность существования вынужденного излучения, но и доказал, что оно когерентно вынуждающему излучению.

Опираясь на эти выводы, немецкие физики Korfmann, Ladenburg [2] в 1928 г. экспериментально открыли явление отрицательной дисперсии, что явилось косвенным доказательством возможности существования индуцированного излучения. Но вынужденное излучение было очень слабым, и различить его на фоне спонтанного излучения было

сложно. До лазера оставался лишь шаг: чтобы усилить вынужденное излучение, в среду необходимо ввести положительную обратную связь, т.е. поместить ее в резонатор. В 1939 г. В.А. Фабрикант в своей докторской диссертации показал возможность усиления света за счет вынужденного испускания в плазме с инверсией населенностей на энергетических уровнях и высказал идею использования вынужденного излучения для усиления «коротких» волн. В работе Lamb, Retherford [3] приведены первые экспериментальные результаты, демонстрирующие появление вынужденного излучения в спектрах водорода. В 1950 г. Каствлер (Нобелевская премия по физике в 1966 г.) предложил метод оптической накачки, экспериментально подтвердив его два года спустя [4]. В мае 1952 г. на Общесоюзной конференции по радиоспектроскопии советские физики (впоследствии академики) Н.Г. Басов и А.М. Прохоров сделали доклад о принципиальной возможности создания усилителя излучения в СВЧ-диапазоне, в котором теоретически обосновали возможность создания усилителей и генераторов электромагнитного поля за счет индуцированного излучения квантовыми системами, находящимися в состоянии инверсной населенности. Они же предложили эффективный метод получения инверсной населенности при селективной накачке трехуровневой системы, который теперь широко используется в лазерах и квантовых усилителях [5].

В этот период были созданы принципиально новые приборы — квантовые генераторы (мазеры) и малошумящие усилители радиочастотного диапазона. Практически одновременно предложение об использовании вынужденного испускания для

* Георгий Михайлович Креков (gm@iao.ru); Геннадий Григорьевич Матвиенко (mgg@iao.ru).

усиления и генерирования миллиметровых волн было высказано в 1952 г. Townes [6]. В 1954 г. молекулярный генератор, названный вскоре мазером, стал реальностью. Он был разработан и создан независимо и одновременно в двух точках земного шара — в Физическом институте имени П.Н. Лебедева и в Колумбийском университете США.

Начиная с 1958 г. специалистами различных стран активно изучалась возможность применения подобного метода для создания генераторов оптического диапазона. Интенсивные теоретические и экспериментальные исследования в СССР и США вплотную подвели ученых в самом конце 50-х гг. к созданию лазера. Успех выпал на долю американского физика Т. Меймана. В 1960 г. в двух научных журналах появилось его сообщение [7] о том, что ему удалось получить на рубине генерацию излучения в оптическом диапазоне. Так мир узнал о рождении первого «оптического мазера» — лазера на рубине.

Первый образец лазера выглядел достаточно скромно: маленький рубиновый кубик (1x1x1 см), две противоположные грани которого имели серебряное покрытие (эти грани играли роль зеркал резонатора), периодически облучался зеленым светом от лампы-вспышки высокой мощности, которая змеей охватывала рубиновый кубик. Генерируемое излучение в виде красных световых импульсов испускалось через небольшое отверстие в одной из посеребренных граней кубика.

В том же 1960 г. была получена [8] генерация оптического излучения в электрическом разряде в смеси гелия и неона. Так родился первый газовый лазер, появление которого было фактически подготовлено экспериментальными исследованиями В.А. Фабриканта, выполненными в 1957 г. Начиная с 1961 г. лазеры разных типов (твердотельные и газовые) занимают прочное место в оптических лабораториях. Осваиваются новые активные среды, разрабатывается и совершенствуется технология изготовления лазеров. В 1962–1963 гг. в СССР и США одновременно создаются первые полупроводниковые лазеры. С этого времени начался новый, «лазерный» период оптики.

За фундаментальные исследования в области квантовой электроники, приведшие к созданию мазеров и лазеров, Н.Г. Басову и А.М. Прохорову совместно с американским ученым Ч. Таунсом присуждена Нобелевская премия по физике. Считая проблему создания мощных лазеров одной из важнейших для лазерной физики, Н.Г. Басов в 1962 г. инициирует и впоследствии возглавляет обширный цикл исследований, в результате которых было создано целое семейство новых мощных лазеров — фотодиссоционных, эксимерных, электроионизационных, химических. Именно в это время и у нас, и в США начались исследования, направленные на создание принципиально новых электромагнитных средств доставки энергии высокой плотности.

Для всесторонней оценки потенциальных возможностей подобных систем на основе лазерного излучения стала очевидной необходимость проведе-

ния обширного цикла фундаментальных исследований, связанных с изучением особенностей распространения интенсивного когерентного излучения различных лазеров в реальных атмосферных условиях. В этих целях в 1969 г. в Томске был открыт Институт оптики атмосферы СО АН СССР. Институт возглавил блестящий ученый и организатор, доктор ф.-м. наук (впоследствии академик) Владимир Евсеевич Зуев.

Ученые и специалисты ИОА успешно справляются с поставленной задачей. За истекшие 40 лет ими проведен не только огромный объем фундаментальных исследований, нашедших отражение в сотнях статей и монографий, но и выполнен по заданиям правительства ряд важных опытно-конструкторских работ. Среди них наиболее известен проект «БАЛКАН», итогом которого стало создание первого в мире орбитального лидара, который был выведен на околоземную орбиту в составе модуля «Спектр» многофункциональной космической станции «Мир» в мае 1995 г. [9]. Проведенные исследования показали (см., например, [10]), что влияние атмосферы на энергетические характеристики лазерного излучения гораздо сложнее, чем это представлялось ранее. В частности, повышение интенсивности лазерного импульса приводит к появлению комплекса ранее неизвестных нелинейных эффектов, критическим образом действующих на условия распространения сигнала. Степень воздействия существенным образом зависит от состояния атмосферы, в первую очередь от ее замутненности. Таким образом, на первый план выдвинулась проблема создания методов и технологий оперативной дистанционной диагностики метеорологического состояния атмосферы, облачного покрова, влажности, вертикальной стратификации скорости ветра, прозрачности на протяженных наклонных трассах. Решение этой проблемы стимулировало выделение в рамках научной проблематики ИОА СО РАН нового научного направления — лазерное зондирование атмосферы.

1. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы

История дистанционного оптического зондирования атмосферы началась в 1905 г., когда наш соотечественник В.В. Кузнецов измерил ночью высоту облаков с помощью мощного прожектора. Луч был направлен вертикально вверх, а прибор, регистрирующий рассеянный облаком свет, установлен на определенном расстоянии от прожектора. Изменяя угол наблюдения, из простых геометрических соотношений он определил высоту облаков, наиболее интенсивно рассеивающих свет.

Прожекторное зондирование атмосферы развивалось в течение 50 лет — от простого измерения высоты облаков до определения общего содержания молекул в единице объема воздуха на различных высотах (до 70 км). Достигнутые результаты в достаточной степени систематизированы в коллективной монографии [11]. Отметим, что возможности

даже самого мощного прожектора оказались на этом практически исчерпанными, хотя с помощью различных технических ухищрений и можно было попытаться повысить потолок зондирования. Однако делать этого уже не пришлось: в 1960 г. был создан принципиально новый источник излучения – лазер, а спустя три года итальянский ученый G. Fiosso опубликовал первую работу о лазерном зондировании атмосферы [12]. Годом позже он же провел измерения высоты и толщины серебристых облаков, образующихся в области 73–83 км.

В нашей стране первые эксперименты по лазерному зондированию атмосферы начались в конце 60-х гг. в ИОА СО АН СССР, в Центральной аэрологической обсерватории и Институте экспериментальной метеорологии Росгидромета. Результаты этих исследований нашли отражение в ряде статей и монографий, например [13–18]. Следует отметить, что еще в 1974 г., задолго до практического воплощения, В.Е. Зуевым с сотр. была предложена и теоретически обоснована концепция лидарного зондирования атмосферы из космоса [19]. Результаты более поздних исследований представлены в монографиях [20–22].

Большая часть существующих ранее методик по измерению характеристик атмосферы была основана на контактных способах, т.е. для измерения температуры, влажности или состава атмосферы выше земной поверхности необходимо поместить прибор на самолет, шар-пилот, метеорологическую или геофизическую ракету, искусственный спутник Земли. Методы радиолокации ограничены измерениями интенсивности осадков и количества влаги в атмосфере, а состав самой атмосферы определить уже нельзя – газы поглощают радиоволны в тысячу раз слабее, чем водяной пар. Именно дистанционность лазерных измерений, возможность определить выбранную характеристику воздушной среды на любом направлении лазерного луча и получить самые разнообразные сведения о свойствах атмосферы на различных высотах, хорошее пространственно-временное разрешение (детальное исследование облака, слоя атмосферы и т.д. за короткое время), связанное с малой длительностью импульса и высокой частотой повторения импульсов лазера, и стимулировали столь интенсивное развитие этих методов. Прежде чем обсудить некоторые, наиболее перспективные принципы лидарного зондирования, остановимся кратко на физических процессах взаимодействия лазерного излучения с атмосферой.

2. Упругое и неупругое рассеяние лазерного сигнала в атмосфере

Как отмечено выше, преимуществом метода лидарного мониторинга в отличие от всех других используемых методов является возможность оперативного получения вертикальных профилей различных параметров атмосферы (облачность, аэрозоль, газовые составляющие, температура, влажность, турбулентность, скорость ветра) в интервале высот 0–100 км с высоким пространственным раз-

решением. Наблюдения указанных компонент базируются на использовании различных физических механизмов взаимодействия лазерного излучения с атмосферой как гетерофазной динамической средой. Среди них к настоящему времени разработаны эффективные методы и технологии, основанные на механизмах упругого (молекулярное рассеяние и рассеяние Ми на частицах аэрозоля, резонансное поглощение) и неупругого (комбинационное рассеяние и флуоресценция атмосферных газов и аэрозолей) взаимодействия.

При использовании эффектов упругого взаимодействия излучения с атмосферной средой приемная система лидара настраивается на длину волны излучения передатчика. Принимаемый монохроматический сигнал несет информацию о высоте нижней кромки облачности, фазовом состоянии облаков. В условиях безоблачной атмосферы высотный потолок зондирования может достигать 100–120 км; при этом открывается возможность получения количественной информации о вертикальной стратификации аэрозоля, перистых и полярных облаков верхнего яруса. Для решения более сложных задач, например для определения спектра размеров частиц аэрозоля, зондирование производится на нескольких длинах волн. Длины волн и их количество выбираются таким образом, чтобы исключить влияние эффектов поглощения газовыми компонентами воздуха и обеспечить наибольшую информативность измерений относительно спектра размеров частиц. Для этого зондирование ведется в окнах прозрачности атмосферы, а длины волн должны быть сравнимыми с размерами частиц аэрозоля [23].

Масштабы использования явления неупругого взаимодействия (спонтанное комбинационное рассеяние (СКР), спонтанная флуоресценция) в настоящее время непрерывно расширяются, поскольку информативность их по отношению к параметрам аэрозольно-газовой атмосферы существенно выше, несмотря на более низкие показатели оптического взаимодействия. Эффект СКР возникает в результате неупругого соударения фотона с молекулой вещества, при котором изменяются как состояние молекулы, так и энергия, а следовательно, и частота фотона. В результате такого взаимодействия в спектре рассеянного излучения появляются линии и полосы, частотный сдвиг которых относительно линии возбуждающего излучения определяется структурой энергетических уровней рассеивающей молекулы. Вид спектра СКР определяется неповторимой комбинацией разрешенных переходов между возможными вращательными и колебательно-вращательными состояниями и является уникальным для каждой молекулы, что позволяет проводить дистанционное определение состава атмосферы на основе анализа оптического спектра лидарного отклика [18, 20].

Флуоресценция также представляет собой двухступенчатое неупругое взаимодействие, состоящее в поглощении фотонов на частоте генерации лазера с последующей спонтанной эмиссией фотонов

в более длинноволновую часть спектра. В атомах и простых молекулах спектр флуоресценции носит дискретный характер с частотами переизлученных фотонов, близкими к частоте возбуждения. Такую флуоресценцию называют резонансной (РФ); сечения оптического взаимодействия РФ на несколько порядков выше сечений СКР. Это определяет возможность зондирования параметров верхней мезосферы и термосферы, где локализуются слои атомных и ионных паров металлов К, Na, Ca и др. В сложных молекулах, таких как углеводороды, вторичные метаболиты растений, пигменты, бактерии и пр., возбуждение от поглощенного фотона на длине волны генерации лазера перераспределяется по разным энергетическим уровням за счет безызлучательных переходов. В этом случае возникающий спектр СКР приобретает широкополосный континуальный характер. Спектры тем не менее имеют специфичные, индивидуальные для каждого молекулярного соединения, особенности, что создает физическую основу для их дистанционной лидарной диагностики.

3. Лазерные источники для дистанционного зондирования

В качестве источников излучения в лидарных системах дистанционного зондирования необходимы лазеры, генерирующие короткие мощные импульсы излучения с малой угловой расходимостью. Когда лидар предназначен для получения карт распределения контролируемого параметра с борта самолета или орбитальной платформы, необходима также высокая частота повторения импульсов. По типу активной среды лазеры, используемые для зондирования атмосферы, условно подразделяются на несколько классов: твердотельные, газовые, жидкостные, полупроводниковые, эксимерные и лазеры на свободных электронах [24, 25].

Наибольшее распространение получили надежные в эксплуатации твердотельные лазеры на стекле с неодимом (Nd:YAG), генерирующие на основной частоте 1064 нм с последующим параметрическим делением длин волн на гармоники: 2-я – 532; 3-я – 355 и 4-я – 266 нм с энергией импульса до 1,0–1,5 Дж. Эти характеристики обеспечивают измерения стратосферного аэрозоля (10–30 км), температуры и плотности атмосферы на высотах 30–100 км, при этом используется соответственно аэрозольное или молекулярное рассеяние. На длине волн 532 нм по доплеровскому сдвигу можно определять высотный профиль ветра на высотах 10–50 км путем зондирования вертикальным и двумя наклонными лучами [18, 20, 21].

Эксимерный лазер (XeCl) с излучением на длинах волн 308 и 355 нм позволяет измерять на основе метода дифференциального поглощения высотные профили озона на высотах 10–50 км [22]. Используя лазеры, излучающие на D2-линии натрия (589 нм), можно определять высотное распределение концентрации мезосферного натрия, темпера-

туру и ветер в атмосфере на высотах 80–100 км, а также параметры внутренних гравитационных волн.

Твердотельные лазеры нового поколения на Ti:Sapphire эффективны для зондирования тропосферного аэрозоля и малых газовых компонентов пограничного слоя атмосферы [20]. Обстоятельный обзор современного состояния в технологии источников и приемников лазерного излучения содержится в [25].

4. Лазерное зондирование аэрозольной атмосферы

Аэрозоли играют огромную роль в процессах формирования радиационного поля в атмосфере, в процессах погодообразования, участвуют в различных физико-химических превращениях, в том числе связанных с загрязнениями атмосферы продуктами индустриальной деятельности. Нерегулярная пространственная структура и изменчивость свойств аэрозоля и облачных образований крайне затрудняют получение обычными контактными методами статистических данных об оптических характеристиках аэрозольного поля. Поэтому для исследования динамики аэрозольных полей в атмосфере целесообразно использовать дистанционные методы, основанные на применении лазеров. При распространении лазерного излучения в атмосфере часть энергии электромагнитной волны рассеивается в обратном направлении, проходит тот же путь и может быть зарегистрирована приемником.

Величина принятого сигнала с расстояния z от лидара описывается уравнением лазерного зондирования, которое в приближении однократного рассеяния обычно представляется в виде [13–18]:

$$P(z, \lambda_k) = AP_0(\lambda_k)G(z)z^{-2}\beta_\pi(z, \lambda_k)T^2(z), \quad (1)$$

где $P(z, \lambda_k)$ – мощность отраженного сигнала на длине волны λ_k ; $P_0(\lambda_k)$ – энергия зондирующего импульса на длине волны λ_k ;

$$\beta_\pi(z, \lambda_k) = \beta_s(z, \lambda_k)g_\pi(z, \lambda_k)$$

– объемный коэффициент обратного рассеяния; $g_\pi(z, \lambda_k)$ – модуль вектора индикатрисы рассеяния для угла 180° ;

$$T(z) = \exp\left\{-\int_0^z \beta_t(z', \lambda_k)dz'\right\}$$

– интегральное пропускание; $\beta_t(z, \lambda_k)$ и $\beta_s(z, \lambda_k)$ – объемные коэффициенты соответственно ослабления и рассеяния; A – аппаратная константа лидара, определяемая площадью приемной системы лидара и пропусканием оптических элементов; $G(z)$ – геометрический форм-фактор лидара.

В общем случае уравнение (1) содержит три неизвестные оптические характеристики $\beta_s(z)$, $\beta_t(z)$ и $g_\pi(z)$ и, несмотря на простой вид, не может быть решено без каких-либо допущений или априорной информации о связи указанных переменных.

За 40 лет развития теории лазерного зондирования предложены десятки подходов и методов, направленных на исключение неопределенности в решении (1); наиболее полно они представлены в недавнем аналитическом обзоре В.А. Ковалева [21]. Так, в видимом диапазоне и окнах прозрачности ближнего ИК-диапазона волн оправдано допущение $\beta_s(z) = \beta_r(z)$. Кроме того, часто предполагается существование эмпирической степенной зависимости коэффициентов

$$\beta_\pi(z) = k_1 \beta_s(z)^{k_2}, \quad (2)$$

где k_1 и k_2 – постоянные коэффициенты, заранее известные для определенного класса рассеивающих сред.

В работе Collis [26] соотношение (2) использовалось для построения автоматизированной системы обработки, основанной на измерении так называемой лидарной S -функции:

$$S(z) = 10 \log \frac{P(z)z^2}{P(z_0)z_0^2} = 10 \log \frac{\beta_\pi(z)T^2(z)}{\beta_\pi(z_0)T^2(z_0)}, \quad (3)$$

где $\beta_\pi(z_0)$ – известное базовое значение в начальном участке трассы зондирования.

Дифференцируя (3) с учетом (2), несложно получить нелинейное дифференциальное уравнение I-го порядка:

$$\frac{d\beta_s(z)}{dz} - c_1 \frac{dS_c(z)}{dz} \beta_s(z) - c_2 \beta_s^2(z) = 0, \quad (4)$$

где $c_1 = 1/4, 34k_2$ и $c_2 = 2/k_2$. Уравнение (4) линеаризуется подстановкой $\eta = 1/\beta_s$, и окончательное решение записывается в виде [14, 26]:

$$\beta_s(z) = \beta_s(z_0) \left\{ 1 - c_2 \beta_s(z_0) \int_{z_0}^z \exp\{c_1 S_0(z')\} dz' \right\}^{-1}, \quad (5)$$

где $\beta_s(z_0)$ – известное значение в начальном участке трассы зондирования.

Выражение, подобное (5), с той разницей, что $\beta_s(z_0)$ предложено выбирать в конце трассы, получено позднее в работе [28] и незаслуженно вошло в западную литературу как «метод Клетта». В действительности, и этот факт отмечается в недавней монографии [21], идея инверсной обработки лидарного сигнала была много раньше реализована в трудах специалистов ИОА, например в [14, 27].

Неприятной особенностью лазерного зондирования облачной атмосферы является значительный вклад в регистрируемый сигнал помехи многократного рассеяния [7], что приводит к быстрому расхождению решения, при этом величина искомого параметра $\beta_\pi(z)$ к концу трассы зондирования неограниченно возрастает, затем срывается в область отрицательных значений [14, 21, 24]. В работе [14], а позднее в [30], был предложен простой параметрический подход, основанный на введении нелинейной зависимости

$$\beta_\pi(z) = g_\pi(z) \beta_t(z) \exp\left\{ 2\zeta \int_{z_0}^z \beta_t(z') dz' \right\}, \quad (6)$$

где ζ – некоторый параметр, определяемый геометрией лидарного эксперимента. Подстановка (6) в (1) приводит к дифференциальному уравнению типа Бернулли, которое допускает явное решение. При граничном условии $T^2(z = z_0) = 1$ непосредственно следует

$$T^2(z) = \left\{ 1 - 2(1 - \xi) \int_{z_0}^z U(z') / g_\pi(z) dz' \right\}^{1/(1-\xi)}, \quad (7)$$

где $U(z) = [P(z)z^2]/[P_0 G(z)A]$ – квадратично-усиленный сигнал обратного рассеяния в относительных единицах. Как показали результаты численных и натуральных экспериментов [14, 21, 24, 29, 30], решение (7) обладает повышенной устойчивостью к помехе многократного рассеяния.

Интересные возможности лазерной диагностики фазового состава облачного аэрозоля связаны с использованием поляризационных характеристик эхосигналов. Согласно теории Ми [10] при рассеянии излучения в направлении назад сферическими однородными частицами состояние поляризации отраженного пучка не изменяется по сравнению с падающим на частицы излучением. Поэтому если при зондировании аэрозоля линейно поляризованным излучением в отраженном сигнале появляется кроссполяризованный компонент, то он обусловлен либо несферичностью и анизотропией частиц, либо многократным рассеянием. Строгий количественный анализ этих процессов на основе численного решения векторного уравнения впервые выполнен в [16]. Однако для извлечения информации о среде необходимы упрощенные аналитические выражения, определяющие взаимосвязь состояния поляризации лидарного сигнала с параметрами исследуемого аэрозоля. Строгого решения такой задачи до настоящего времени не получено.

В работе [31] предложен приближенный метод оценки вектор-параметра Стокса двукратно рассеянного назад излучения, основанный на учете первой и второй кратностей рассеяния. Для моностатической схемы лидара оценка имеет вид

$$\begin{aligned} \hat{S}^{(2)}(z) = P^{(1)}(z) \frac{z^2}{4\pi g_\pi(z)} & \left\{ \int_0^{\pi/2} \int_{z'}^z \frac{\beta_s(z') \sin \gamma}{z^2 - (2z - z')z' \sin^2 \gamma/2} \times \right. \\ & \times \int_0^{2\pi} [\hat{K}(\varphi) \hat{f}(z, \gamma') \hat{f}(z', \gamma) \hat{K}(\varphi) \hat{S}^0 + \\ & \left. + \hat{K}(\varphi) \hat{f}(z', \gamma) \hat{f}(z, \gamma') \hat{K}(\varphi) \hat{S}^0] d\varphi dz' d\gamma, \right. \quad (8) \end{aligned}$$

где $P^{(1)}(z)$ – мощность эхосигнала за счет однократного рассеяния, определяемого по (1); z' – граница темновой зоны; $\hat{f}(z, \gamma)$ – нормированная матрица рассеяния размерностью 4×4 элемента; γ –

угол рассеяния; $\hat{K}(\varphi)$ — матричный оператор, зависящий от угла поворота φ плоскости референции; $\hat{S}^{(0)}$ — безразмерный вектор Стокса зондирующего пучка в системе координат, связанной с выбранной плоскостью отсчета (например, горизонтальной) [32]. Выражение (8) в достаточно общем виде определяет состояние поляризации лидарного сигнала, обусловленного двукратным рассеянием. Причем на параметры среды и состояние поляризации зондирующего пучка ограничений практически не накладывается.

5. Лазерное зондирование метеорологических параметров атмосферы

5.1. Лазерное зондирование скорости ветра

Знание полей метеорологических параметров, определяющих процессы погодообразования, имеет принципиальное значение. Высокая динамичность метеопараметров требует разработки дистанционных лидарных методов, обеспечивающих получение данных с высокой оперативностью и в значительных пространственных масштабах. В сложившейся практике лазерного зондирования одного из основных и наиболее изменчивых параметров — скорости ветра — традиционно сформировались два подхода.

Корреляционный принцип основан на том, что пространственное распределение атмосферного аэрозоля в реальной атмосфере имеет пространственно-неоднородную мелкомасштабную структуру. С этой точки зрения оптическое состояние атмосферы как случайный объект представляет собой широкую основу для приложений корреляционно-экстремальных систем, в основе которых лежит корреляционный метод оценки близости исследуемых полей. Теория корреляционно-экстремальных систем обработки информации хорошо развита применительно к геофизическим полям с большим радиусом корреляции (см., например, [33]). Ряд методологических вопросов, определяющих особенности применения корреляционных методов к атмосферно-оптическим полям, рассмотрен в [34, 35].

Корреляционные методы требуют создания на каждой исследуемой высоте нескольких пространственно-разнесенных рассеивающих объемов (информационных), время переноса рассеивающих

элементов между которыми является мерой скорости. Средней оценкой времени переноса выступает положение максимума соответствующей взаимно корреляционной функции сигналов лидара. Учитывая, что в атмосфере скорости горизонтальных потоков значительно превышают скорости восходящих и нисходящих течений, метод корреляционного анализа наиболее продуктивен в случае плоской геометрии наблюдения, когда корреляционная функция становится функцией только пространственных сдвигов ξ и η в горизонтальной плоскости и временного смещения τ . В этом случае нормированная корреляционная функция коэффициента обратного рассеяния в системе координат, связанной с наземным наблюдателем, может быть представлена в следующем виде [35]:

$$B(\xi, \eta, \tau) = h \left\{ A(\xi - V_x \tau)^2 + M(\eta - V_y \tau)^2 + 2L(\xi - V_x \tau)(\eta - V_y \tau) + K\tau^2 \right\}, \quad (9)$$

где h — некоторая однозначная и ограниченная функция; C , M , L и K — коэффициенты квадратичной формы, задающие размеры, форму (первые три) и время жизни (последний) аэрозольных неоднородностей. Такая запись нормированной корреляционной функции обеспечивает более явное представление о ее зависимости от скорости ветра.

С целью измерения скорости $V = (V_x^2 + V_y^2)^{1/2}$ в горизонтальной плоскости проводятся два типа наблюдений: всей или части среды в два момента времени, разделенных интервалом τ_0 ; в нескольких фиксированных точках атмосферы на расстоянии ξ_0 . В первом случае это пространственные измерения корреляции, а во втором — временные. Их отличительная особенность — возможность измерения профиля векторных значений скорости ветра при соответствующем выборе конфигурации рассеивающего объема. Пример результатов лазерной локализации скорости ветра в безоблачной атмосфере приведен в таблице, где они показаны в сопоставлении с данными синхронных измерений контактным (теодолит) и радиолокационным методами. Абсолютная погрешность лазерных измерений модуля скорости ветра находится в пределах 0,1–2,2 м/с или в относительных величинах от 3 до 26%.

В дистанционных исследованиях атмосферных динамических процессов широко используются также когерентные доплеровские лидары, позволяющие получать оценку радиальной компоненты

Результаты измерений скорости ветра V и направления ветра Φ в безоблачной атмосфере; время реализаций 300 с, метеорологическая дальность видимости $S_m \geq 15$ км

H , м	Лидар		Теодолит		Радиолокатор	
	V , м/с	Φ , град	V , м/с	Φ , град	V , м/с	Φ , град
210	1,15	133	—	—	—	—
300	3,2	106	—	—	2,4	130
320	6,0	299	7,4	288	—	—
600	8,03	131	7,9	140	—	—
650	4,0	198	5,5	180	—	—

скорости ветра $V_r = \mathbf{V} \cdot \mathbf{S}$, т.е. проекции вектора скорости ветра $\mathbf{V} = \{V_z, V_x, V_y\}$ на ось зондирующего пучка ($\mathbf{S} = \{\sin\varphi, \cos\varphi\cos\theta, \cos\varphi\sin\theta\}$, где φ — угол места, θ — азимутальный угол). Оценка радиальной скорости осуществляется по доплеровскому сдвигу частоты f_D лазерного излучения, рассеянного в обратном направлении аэрозольными частицами, движущимися с ветровым потоком, по формуле Доплера $V_r = f_D \lambda / 2$, λ — длина волны. Чтобы определить скорость и направление ветра, требуется осуществлять коническое сканирование зондирующим пучком вокруг вертикальной оси.

Традиционный метод определения \mathbf{V} из данных сканирующего лидара заключается в получении массива оценок радиальных скоростей ветра $\hat{V}_r(\theta_i)$ по исходным данным, измеренным под разными азимутальными углами θ_i , и подгонке этого массива к синусоидальной зависимости $V_r(\theta_i) = \mathbf{V} \cdot \mathbf{S}(\theta_i)$ методом наименьших квадратов. Такой подход применим лишь при достаточно высоком отношении сигнал-шум SNR.

В [36–38] предложен новый метод (аккумуляции спектров), позволяющий существенно расширить возможности измерения скорости и направления ветра доплеровскими лидарами при низких SNR. Суть метода заключается в том, что вместо оценивания радиальных скоростей $\hat{V}_r(\theta_i)$ из каждого измеренного доплеровского спектра $W_i(f)$ и последующего определения \mathbf{V} рассчитывается функция

$$F(\mathbf{V}) = n^{-1} \sum_{i=1}^n W_i(\mathbf{S}(\theta_i) \cdot \mathbf{V} \cdot 2 / \lambda)$$

и по ее максимуму находится вектор скорости ветра \mathbf{V} , где n — число измеренных спектров. Благодаря осуществляемому в методе накоплению спектров, удается подавлять их шумовую составляющую и определять скорость и направление ветра при очень низких SNR.

Данный метод может быть успешно применен для измерения профилей ветра из космоса на больших высотах, когда SNR невелико [36]. Наряду с оценкой вектора скорости ветра, данные измерений радиальной скорости когерентными доплеровскими лидарами используются для определения параметров ветровой турбулентности. Апробация методов в натурных экспериментах проводилась в рамках научной кооперации между Институтом оптики атмосферы и Институтом физики атмосферы Немецкого авиакосмического центра (г. Оберпфaffenхофен) [37].

5.2. Лазерное зондирование вертикальных профилей влажности

Другим важнейшим параметром атмосферы является влажность — содержание водяного пара. Для его оперативной диагностики наибольшее применение получил лидарный метод дифференциального поглощения, основанный на использовании явления резонансного поглощения зондирующего

излучения в области селективных линий поглощения молекул водяного пара атмосферы. Распространяясь по трассе зондирования до исследуемого объема и обратно, лазерный импульс при взаимодействии с атмосферой ослабляется за счет рассеяния и поглощения на ее молекулах и аэрозолях.

Если два разноволновых лазерных импульса расположены в достаточно узком спектральном диапазоне, то их характеристики рассеяния в пределах этого диапазона практически не изменяются. Это позволяет, сравнивая лидарные эхосигналы от данных импульсов, выделить в чистом виде зависимость отношения измеряемых сигналов только от поглощения по трассе зондирования. В случае, если импульсы посылаются в атмосферу за время, не превышающее интервал турбулентной замороженности атмосферы, профиль концентрации водяного пара по трассе зондирования вдоль пространственной оси z восстанавливается из лидарных данных по известной формуле [18, 20, 25]:

$$a(z) = \frac{1}{2[k_0(z) - k_1(z)]\Delta z} \ln \frac{P_0(z)P_1(z + \Delta z)}{P_0(z + \Delta z)P_1(z)}, \quad (10)$$

где $k_0(z)$ и $k_1(z)$ — профили коэффициентов поглощения на двух близких частотах зондирующего излучения, лежащих соответственно в линии и в крыле линии поглощения молекул водяного пара; Δz — пространственное разрешение по трассе зондирования; $P_0(z)$ и $P_1(z)$ — профили обратно отраженных атмосферой эхосигналов на двух частотах в соответствии с формулой (1).

Применение эффекта спонтанного комбинационного рассеяния также позволяет проводить дистанционное определение отношения смеси для водяного пара [20, 35, 39, 40]. При этом профиль парциального давления водяного пара определяется из отношения СКР-лидарного отклика водяного пара к СКР-лидарному отклику азота в каждой точке трассы зондирования. Принцип относительных измерений обеспечивает высокую устойчивость метода к влиянию аппаратурных и атмосферных факторов на точность определения влажности.

В последние годы сотрудниками ИОА совместно с Федеральным политехническим институтом г. Лозанны по заказу метеослужбы Швейцарии был разработан СКР-метеолidar, позволяющий проводить одновременное дистанционное исследование температуры и влажности атмосферы. При этом возможно определение содержания водяного пара днем до высот 6–7 км. Этот результат был достигнут благодаря использованию оригинальных технических решений в конструкции лидара [40, 41]. На рис. 1 приведены результаты сравнения данных зондирования СКР-метеолidarом и радиозондами двух типов [45]. Видно хорошее совпадение значений отношения смеси, полученных тремя независимыми способами.

Очевидно, что лидарные методы на основе эффекта СКР, несмотря на серьезные трудности, возникающие на пути их технической реализации, занимают достойное место среди прочих методов лазерного зондирования.

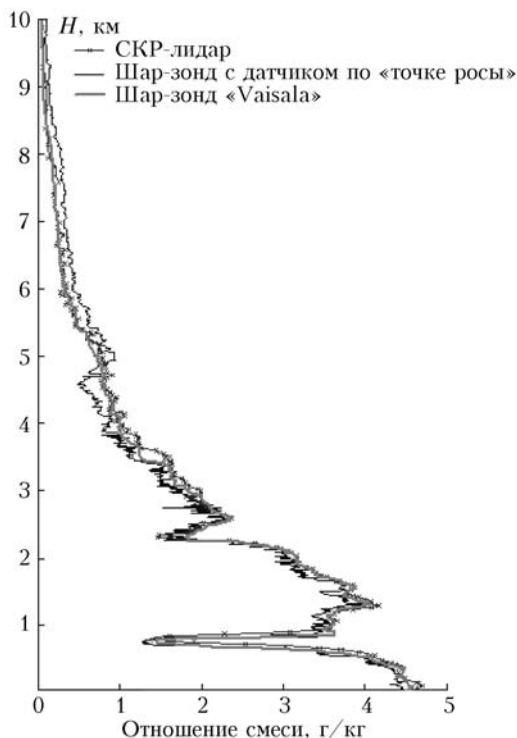


Рис. 1. Сравнение данных зондирования СКР-метеолидаром и радиозондами двух типов по данным [45]

Метод измерения температуры по распределению интенсивностей линий чисто вращательного спектра СКР на молекулах азота и кислорода в настоящее время является практически безальтернативным. Метод измерения влажности по отношению интенсивностей Q -ветвей колебательно-вращательных спектров СКР водяного пара и азота является достаточно простым и распространенным способом дистанционного определения парциального давления газообразной воды в атмосфере. Все большее распространение получает идея использования эффекта СКР для разделения аэрозольной и молекулярной компонент рассеяния при лидарных измерениях оптических параметров атмосферы [20, 21]. Появление новых источников излучения в сочетании с высокими достижениями в области матричных фотодетекторов выводит на качественно новый уровень системы дистанционного газоанализа, использующие эффект СКР. Преимуществом таких систем является возможность одновременного обнаружения нескольких загрязняющих компонентов.

6. Потенциальные возможности фемтосекундных лазеров для зондирования параметров атмосферы

Во второй половине 1990-х гг. эксперименты с излучением фемтосекундных лазеров на $Ti:Sa$ мощностью около 50 ГВт привели к открытию явления устойчивой локализации световой энергии в узкой протяженной области диаметром порядка 100 мкм [44]. Эта область, имеющая характер пре-

рывистой светящейся нити, получила название филамента. Вокруг филамента возникает слаборасходящееся излучение конической эмиссии с непрерывным спектром как в коротковолновую, так и в длинноволновую области. В результате дальнейших исследований было обнаружено, что при определенных режимах генерации излучения и фокусировки пучка с увеличением пиковой мощности импульсов более 2 ТВт филаментация возникает спорадически во множестве точек сечения пучка, приводя к образованию стабильного суперконтинуума излучения.

Уникальные качества вторичного широкополосного импульсного излучения определили новые перспективы дистанционного зондирования окружающей среды. Лидар белого света (ЛБС) позволяет более конструктивно подойти к задаче многочастотного зондирования микрофизических параметров аэрозольных частиц, отказавшись от эксплуатации громоздких, сложных в управлении мультилидарных систем. Появляется возможность оптимального выбора длин волн зондирования, информативных для данного класса метеорологических объектов.

В работе [29] показана принципиальная возможность дистанционного определения спектра по размерам аэрозольных частиц путем регистрации сигнала обратного рассеяния суперконтинуума на 3–4 длинах волн видимого участка спектра. Однако при этом появляется ряд специфических вопросов, связанных с недостаточным информативным содержанием сигналов белого света относительно грубодисперсной фракции аэрозоля и большинства гидрометеоров. В перспективе решение этих вопросов возможно путем использования нового поколения оптоволоконных лазерных источников широкополосного излучения, генерирующих в ближнем ИК-диапазоне волн.

Анализ современных тенденций развития фемтосекундной лазерной техники ИК-диапазона волн выполнен в монографии [44]. Определены принципы выбора информативных длин волн оптического зондирования в пределах континуального излучения широкополосного ЛБС, на основании чего в работе [42] предложен и реализован эффективный алгоритм решения обратной задачи восстановления вертикальных профилей коэффициентов оптического взаимодействия и спектра размеров частиц в пределах слоисто-неоднородного облачного слоя. Алгоритм основан на сочетании нейросетевого подхода с принципами стохастического генетического поиска. На рис. 2 показан пример восстановления вертикального разреза в 3D-геометрии спектра распределения облачных капель по сигналам локационного рассеяния на длинах волн 1,28; 1,56; 1,61 и 2,13 мкм, полученных в модельном эксперименте в граничных условиях, отражающих схему реального лидара [42].

Сочетание лидаров белого света с возможностями Фурье-спектроскопии высокого разрешения открывает путь эффективного подхода к решению традиционных проблем лидарного зондирования газового состава атмосферы.

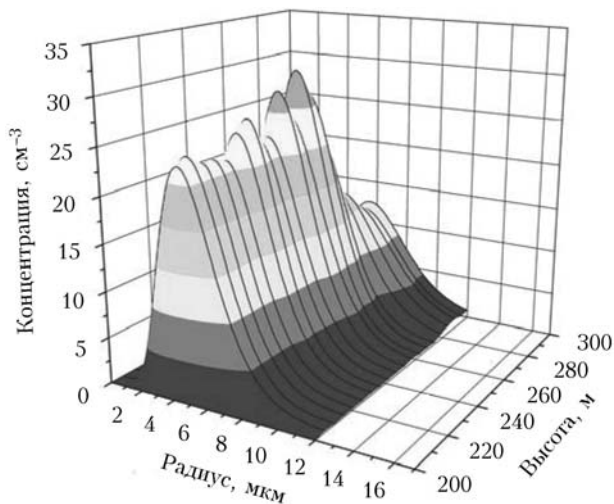


Рис. 2. Восстановление высотного профиля спектра распределения облачных капель по размерам по данным многочастотного зондирования на длинах волн 1,28; 1,56; 1,61 и 2,13 мкм на основе метода нейронных сетей

Результаты замкнутого численного эксперимента [43] показали перспективность применения гибридной технологии LIDAR-DOAS для контроля концентрации водяного пара и малых газовых примесей в тропосферном слое, в качестве распределенного трассового отражателя можно использовать атмосферный аэрозоль. Приведенные количественные оценки подтверждают возможность дистанционного контроля и локализации опасных антропогенных выбросов токсичных газов с пространственным разрешением не хуже 1 км до высоты тропопазузы.

Представленный выше анализ развития лидарных технологий дистанционного исследования атмосферы иллюстрирует широкое применение новых лазерных технологий в проблеме дистанционного зондирования атмосферы. Ряд специфичных явлений взаимодействия лазерного излучения с аэрозольно-газовой и растительной средами (люминесценция, вынужденные излучения, эффекты нелинейной оптики и пр.) еще в недостаточной степени представлены в практике лидарного зондирования. Тем не менее следует ожидать, что прогресс в электронике и лазерной технике сделает реалистичными и эти новые подходы.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проекты № 09-01-00698, 09-07-00477).

1. *Einstein A.* Zum Quantensatz von Sommerfeld und Epstein // Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft. 1917. V. 19. P. 82–92.
2. *Kopfermann H., Ladenburg R.* Experimental Proof of «Negative Dispersion» // Nature (Germany). 1928. V. 122, N 2. P. 438–439.
3. *Lamb W.E., Retherford R.C.* Fine Structure of the Hydrogen Atom by a Microwave Method // Phys. Rev. 1947. V. 72, N 1. P. 241–243.
4. *Kastler A.* Optical Methods of Atomic Orientation and of Magnetic Resonance // J. Opt. Soc. Amer. 1957. V. 47, N 6. P. 460–465.

5. *Басов Н.Г., Прохоров А.М.* Молекулярный генератор и усилитель // Успехи физ. наук. 1955. Т. 57, № 3. 485 с.
6. *Gordon J.P., Zeiger H.J., and Townes C.H.* Molecular Microwave Oscillator and New Hyperfine Structure in the Microwave Spectrum of NH_3 // Phys. Rev. 1954. V. 95. P. 282–284.
7. *Maiman T.H.* Stimulated Optical Radiation in Ruby // Nature (Gr. Brit.). 1960. V. 187, N 4736. P. 493–494.
8. *Javan A., Bennet W.R., Jr., Herriot D.R.* Population inversion and continuous optical maser oscillation in a gas discharge containing a helium neon mixture // Phys. Rev. 1961. V. 6. P. 106–110.
9. *Балин Ю.С., Знаменский И.В., Зуев В.Е., Мельников В.Е., Самойлова С.В., Тихомиров А.А.* Российский космический лидар «БАЛКАН» // Оптика атмосф. и океана. 1995. Т. 8, № 9. С. 1332–1343.
10. *Зуев В.Е.* Распространение лазерного излучения в атмосфере. М.: Радио и связь, 1981. 288 с.
11. *Прожекторный луч в атмосфере.* Исследования по атмосферной оптике / Под общ. ред. Г.В. Розенберга. М.: Изд. АН СССР, 1968. 244 с.
12. *Fiocco G., Smulin L.D.* Detection of scattering layers in the upper atmosphere (60–140 km) by optical radar // Nature (Gr. Brit.). 1963. V. 199, N 5. P. 1275–1276.
13. *Применение лазеров для определения состава атмосферы* / Под ред. В.М. Захарова. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 216 с.
14. *Вопросы лазерного зондирования атмосферы* / Под ред. В.Е. Зуева. Новосибирск: Наука, 1976. 190 с.
15. *Захаров В.Е., Костко О.К.* Метеорологическая лазерная локация. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 222 с.
16. *Лазерное зондирование атмосферы* / Под ред. В.Е. Зуева. М.: Наука, 1976. 155 с.
17. *Креков Г.М., Наац И.Э., Самохвалов И.В., Лонасов В.П.* Дистанционные методы исследования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1976. 160 с.
18. *Лазерное зондирование атмосферы из космоса* / Под ред. В.М. Захарова. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 214 с.
19. *Zuev V.E., Krekov G.M., Naats I.E.* Determination of aerosol parameters of the atmosphere from space // Acta Astronaut. 1974. V. 1, N 1. P. 93–103.
20. *Lidar: range-resolved optical remote sensing of the atmosphere* / Claus Weitkamp, editor; foreword by Herbert Walther // Springer series in optical sciences, 2006. V. 102. 456 p.
21. *Kovalev V.A., Eychinger W.E.* Elastic Lidar: Theory, Practice, and Analysis Methods. New Jersey: Wiley & Sons, 2004. 598 p.
22. *Зуев В.В.* Лидарный контроль стратосферы. Новосибирск: Наука, 2004. 306 с.
23. *Иванов А.П., Малевич И.А., Чайковский А.П.* Многофункциональные лидарные системы. Минск: Изд-во Университетское, 1986. 286 с.
24. *Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды* / Под ред. В.Н. Рождественна. М.: Изд-во МВТУ им. Баумана, 2002. 527 с.
25. *Handbook of Laser and Optics* / Ed. by F. Trager. N.Y.: Springer Science + Business Media, 2007. 1320 p.
26. *Collis R.T.H.* Lidar Advances in Geophysics / Ed. by B. Landsberg. N.Y.: Acad. Press, Inc. 1969. V. 13. P. 113–139.
27. *Креков Г.М., Крекова М.М., Хмелевцов С.С.* Лазерное зондирование просветленной зоны оптического канала // III Всесоюз. симпозиум по лазерному зондированию атмосферы: Тез. докл. Томск: Изд. ИОА СО АН СССР, 1974. С. 195–200.
28. *Klett J.D.* Stable analytical inversion solution for processing lidar returns // Appl. Opt. 1981. V. 20. P. 211–220.

29. *Матвиенко Г.Г., Веретенников В.В., Креков Г.М., Крекова М.М.* Дистанционное зондирование атмосферных аэрозолей с использованием фемтосекундного лидара белого света // *Оптика атмосфер. и океана*. 2003. Т. 16, № 12. С. 1107–1115.
30. *Platt C.M.R.* Remote sounding of high clouds. Calculation of Visible and Infrared Optical Properties from Lidar and Radiometer Measurements // *J. Appl. Meteorol.* 1979. V. 18, N 9. P. 1130–1143.
31. *Орлов В.М., Самохвалов И.В., Креков Г.М., Мионов В.Л., Балин Ю.С., Банах В.А., Белов М.Л., Лукин В.П.* Сигналы и помехи в лазерной локации. М.: Радио и связь, 1985. 264 с.
32. *Розенберг Г.В.* Сумерки. М.: ГизФМИ, 1963. 380 с.
33. *Белоглазов И.Н., Тарасенко В.П.* Корреляционно-экстремальные системы. М.: Сов. радио, 1974. 410 с.
34. *Применение корреляционных методов в атмосферной оптике* / В.М. Орлов, Г.Г. Матвиенко, И.В. Самохвалов, Н.Н. Юрга, М.Л. Белов, А.Ф. Овчаренко. Новосибирск: Наука, 1983. 160 с.
35. *Лазерное зондирование тропосферы и подстилающей поверхности* / И.В. Самохвалов, Ю.Д. Копытин, И.И. Ишполитов, Ю.С. Балин, В.В. Зуев, В.М. Климин, С.В. Лазарев, Г.Г. Матвиенко, А.В. Соснин, В.С. Шаманаев. Новосибирск: Наука, 1987. 262 с.
36. *Банах В.А., Вернер Х., Криволицкий Н.П., Смалыхо И.Н.* Точность метода вариационной аккумуляции спектров оценки скорости ветра из доплеровских лидарных данных в турбулентной атмосфере // *Оптика атмосфер. и океана*. 2003. Т. 16, № 8. С. 714–718.
37. *Smalikho I.N., Köpp F., Rahm S.* Measurement of atmospheric turbulence by 2- μ m Doppler lidar // *J. of Atmos. and Ocean. Technol.* 2005. V. 22, N 11. P. 1733–1747.
38. *Банах В.А., Рам Ш., Смалыхо И.Н., Фалиц Ф.В.* Измерение параметров атмосферной турбулентности сканирующим в вертикальной плоскости импульсным когерентным лидаром // *Оптика атмосфер. и океана*. 2007. Т. 20, № 12. С. 1115–1120.
39. *Balin Ju., Serikov I., Bobrovnikov S., Simeonov V., Calpini B., Arshinov Ju., van den Bergh H.* Simultaneous measurement of atmospheric temperature, humidity, and aerosol extinction and backscatter coefficients by a combined vibrational–pure-rotational Raman lidar // *Appl. Phys. B*. 2004. V. 79. P. 775–782.
40. *Arshinov Yu., Bobrovnikov S., Serikov I., Ansmann A., Wandinger U., Althausen D., Mattis I., Müller D.* Daytime operation of a pure rotational Raman lidar by use of a Fabry–Perot interferometer // *Appl. Opt.* 2005. V. 44, N 17. P. 3593–3603.
41. *Dinoyev T., Arshinov Ju., Bobrovnikov S., Serikov I., Calpini B., van den Bergh H. and Simeonov V.* Meteorological water vapor Raman lidar // *Proc. the 23rd Int. Laser Radar Conference (ILRC 2006)*, 24–28 July, Nara, Japan. P. 47–50.
42. *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 атмосфер. и океана*. 2009. Т. 22, № 9. С. 862–872.
43. *Креков Г.М., Крекова М.М., Суханов А.Я.* Оценка потенциальных возможностей широкополосного лидара для дистанционного зондирования молекулярной атмосферы // *Оптика атмосфер. и океана*. 2009. Т. 22, № 5. С. 482–493.
44. *Фемтосекундная атмосферная оптика* / Под ред. Г.Г. Матвиенко, С.Н. Багаева. Новосибирск: Наука, 2010. 290 с.
45. *Матвиенко Г.Г., Банах В.А., Бобровников С.М., Бурлаков В.Д., Веретенников В.В., Кауль Б.В., Креков Г.М., Маричев В.Н.* Развитие технологий лазерного зондирования атмосферы // *Оптика атмосфер. и океана*. 2009. Т. 22, № 10. С. 913–914.

G.M. Krekov, G.G. Matvienko. Laser technology development in the remote sensing of the atmosphere.

The paper presents a short excursus in the history of the advent of lasers and the development of laser technologies as applied to the problem of remote laser sensing of the atmosphere. The paper describes prerequisites of the establishment of the Institute of Atmospheric Optics SB RAS and its role in the investigation of physical processes in the laser radiation propagation in the environment on the whole and in the development of laser sensing methodology, in particular. Using the problem of laser sensing of atmospheric aerosol as an example, a priority role of IAO specialists is shown in the development of effective methods and means for prompt optical control for the environment parameters. The most characteristic results are presented, which show the modern tendencies of introducing the advanced laser technology, including femtosecond lasers, in the promising devices and techniques of lidar sensing.