

УДК 551.501.7

*А. П. ИВАНОВ*

## ЛАЗЕРНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ В БЕЛАРУСИ: ИСТОРИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

*Институт физики имени Б. И. Степанова НАН Беларуси*

*(Поступила в редакцию 18.10.2013)*

**Введение.** Идея использовать световой луч для зондирования атмосферы относится к началу XX в., когда В. В. Кузнецовым [1] была опубликована работа по определению высоты облаков ночью с помощью прожектора. В 1930–1950-х гг. в СССР и за рубежом проводились немногочисленные исследования стратифицированной атмосферы с помощью стационарных и импульсных источников в поляризованном и естественном свете. Однако несовершенства оптических источников излучения и приемников затрудняли широкую реализацию указанной идеи. Появление лазеров дало толчок к свершению подлинной технической революции в проблеме светового зондирования атмосферы и переориентировало нас на использование такого источника излучения.

**Идея и преимущества лазерного зондирования рассеивающей среды.** Сущность лазерного зондирования достаточно проста. С лазерной станции в атмосферу посылается короткий световой импульс. В разные моменты времени он засвечивает разные участки пространства порядка 3–10 м. Чем больше время, тем удаленнее засвечиваемый участок. Рассеянное назад к лазеру засвеченным участком излучение несет информацию об этом участке пространства. Временная развертка регистрируемого приемником сигнала несет информацию по всей трассе. Если просканировать лучом по разным углам, то сведения об атмосфере будут получены по большому пространству, которое будет увеличиваться, если лазерный прибор – лидар – находится на перемещающемся носителе (автомобиле, корабле, самолете, космическом аппарате).

Лазерное зондирование обладает большим количеством достоинств. К ним можно отнести:

- 1) измерение оптических характеристик атмосферы, определяющих радиационный режим, климат Земли и лежащего в основе оценки подавляющего количества компонент среды;
- 2) измерение концентрации разных газов естественного и антропогенного происхождения на уровне предельно допустимых концентраций (ПДК) и даже ниже;
- 3) измерение концентрации, среднего размера, формы, степени полидисперсности частиц аэрозоля, показателя преломления (а в ряде случаев – и химического состава);
- 4) измерение направления и величины скорости ветра, плотности воздуха, давления, профиля температуры, влажности в разных участках пространства;
- 5) высокое пространственное (до нескольких метров) разрешение измеряемой компоненты;
- 6) дальность действия порядка метеорологической дальности видимости (до 2–30 км) по всему обозреваемому объему пространства;
- 7) возможность непрерывного контроля;
- 8) экспрессность;
- 9) неконтактность (сведения о свойствах объема воздуха получаются на большом расстоянии от него).

**Первые работы по нестационарному рассеянию света.** В 1960-е гг. в Институте физики АН Беларуси нами задача ставилась шире: использовать короткий световой импульс не только для зондирования атмосферы, но и для решения других практических проблем. Это можно было сделать, зная закономерности распространения таких вспышек в рассеивающей среде, которые

в то время были практически неизвестны, поэтому начались теоретические и экспериментальные исследования в этом направлении.

Первые теоретические работы по нестационарному рассеянию света выполнены нами совместно с И. Л. Кацевым в 1966 г. [2–4]. Впоследствии теоретической группой под руководством Э. П. Зега в течение нескольких десятилетий была создана прикладная теория переноса излучения [5, 6].

Указанная теория явилась основой решения важных научно-прикладных проблем, обеспечивая их компьютерное моделирование в квазиреальном времени (с выигрышем в расчетном времени в тысячи раз по сравнению с известными методами). Как самостоятельная тема изучено нестационарное поле излучения от пространственно ограниченных источников в рассеивающей среде и получены (в качестве примеров) следующие результаты для световых локаторов – лидаров.

1. Выяснены условия реализации однократного и многократного рассеяния в атмосфере при локации, позволяющие найти соответственно показатели ослабления и поглощения однородной среды.

2. Поскольку облака и водные среды сильно рассеивают свет в направлении «вперед», сформулировано (в отличие от общепринятого) малоугловое локационное уравнение сигнала обратного рассеяния, учитывающее многократное рассеяние вперед и однократное назад [7, 8].

3. Разработан метод определения среднего размера частиц аэрозоля путем использования разных апертур приемного устройства лидара.

4. Разработан метод определения доли несферических частиц аэрозоля путем использования поляризованного света.

5. В системах видения для улучшения качества предложена двойная «отсечка» зондирующего импульса

По многим техническим причинам экспериментальные исследования закономерностей нестационарного рассеяния предполагалось начинать не в атмосфере, а в водной среде. Кроме того, последняя более однородная и можно заранее измерить ее оптические параметры, определяющие рассеяние. Ими могут быть: показатель ослабления света  $\epsilon$ , равный сумме показателей рассеяния  $\sigma$  и поглощения  $k$ ; вероятность выживания фотона  $\Lambda = \sigma/(\sigma + k)$ ; индикатриса рассеяния элементарного объема среды  $x(\gamma)$ , где  $\gamma$  – угол рассеяния. Можно выбрать и другие комбинации параметров, но их всегда будет только три. С этой точки зрения неважно, какие компоненты содержатся в любой среде, каковы природа и физические процессы, определяющие то или иное соотношение между рассеянием и поглощением. Если два совершенно разных по своему строению объекта обладают одинаковыми вышеуказанными параметрами, то у них и структура светового поля будет одинаковой. Более того, в теории переноса размеры среды и положение точки наблюдения определяются не размерными, а безразмерными характеристиками. Например, интенсивность света в точке, положение которой в пространстве определяется вектором  $\mathbf{r}$ , зависит не от этого вектора, а безразмерного вектора  $\epsilon\mathbf{r}$ . При нестационарном рассеянии света процесс зависит также не от размерного времени  $t$ , а безразмерного  $\tau = \epsilon\upsilon t$ , где  $\upsilon$  – скорость света в среде. Поэтому предполагалось, что в дальнейшем полученные результаты можно будет использовать применительно к атмосфере. Сотрудники нашего коллектива И. Д. Шербаф, А. Л. Скрелин, В. Д. Козлов, К. Г. Предко приступили к разработке техники для измерения первичных гидрооптических характеристик и структуры светового поля, создаваемого лазерным импульсом в воде. Детальные эксперименты были проведены в 1966 г. [9] на озере Нарочь в Беларуси.

**Первые работы по лазерному зондированию атмосферы.** В 1968 г. на Звенигородской станции Института физики атмосферы АН СССР нами было проведено лазерное зондирование зарождающегося тумана и изучена его трансформация во времени [10]. Это первое лазерное зондирование атмосферы в СССР. (За рубежом оно осуществлено на рубиновом лазере в 1963 г. [11].) Экспериментальные исследования структуры океана и локации объектов в нем выполнялись в дальнейшем в ходе многих экспедиций, однако основные работы сосредоточились на исследовании атмосферы.

Чтобы изучать свойства атмосферы, нужно сформулировать уравнение, которое бы связало интенсивность принимаемого излучения с оптическими параметрами среды. Системы лазерного

зондирования могут быть совмещенными и несовмещенными. Для таких систем в самом общем случае было записано уравнение, которое содержит не только феноменологические оптические параметры среды (показатели ослабления и рассеяния назад), но и геометрический фактор, зависящий от оптико-геометрических характеристик лидара. На основе решения уравнения предложены и реализованы на практике [12] методы определения показателей: ослабления при совмещенной и несовмещенной схемах прибора в ближней зоне пространства; ослабления в дальней зоне пространства; ослабления методом «двух атмосфер»; ослабления в плоскопараллельной атмосфере; ослабления в любой атмосфере; обратного рассеяния в чистой и замутненной атмосфере.

Впервые методом многоволнового поляризованного лазерного зондирования был проведен длительный цикл исследований спектров оптических характеристик и микроструктуры аэрозоля (распределения частиц по размерам) в нижней атмосфере во многих географических регионах бывшего СССР (полярные и континентальные районы, районы пустынь, Камчатка и Курильские острова) и районах Мирового океана. Измерения осуществлялись с наземных лидарных станций, самолетов и кораблей. Исследована динамика вертикальных профилей параметров атмосферного аэрозоля. Построены региональные статистические модели оптических параметров тропосферного аэрозоля. По сигналам обратного рассеяния сделаны оценки отношения сигнал/шум при решении локационных задач.

**Дальнейшее развитие работ по лазерному зондированию.** Со временем менялся научный состав лаборатории Института, совершенствовалась и появлялась новая техника, разрабатывались новые методики. В 1974 г. группу лазерного зондирования возглавил А. П. Чайковский. Широкий круг научных теоретических и экспериментальных задач рассматривал В. Н. Щербаков. Вопросами общей компоновки, сборки, юстировки лидарной техники, а также измерениями с ее использованием занимались И. С. Хутко, Ф. П. Осипенко, М. М. Король, Н. П. Воробей. Радиоэлектронную аппаратуру разрабатывал А. С. Слесарь, а программное обеспечение – С. В. Денисов. Конструкторская документация создавалась в разное время К. Н. Дятловым, Л. В. Николаевым, Е. В. Рыбальченко, Л. А. Бондарчиком. Большую помощь в создании лидаров оказало Центральное конструкторское бюро (ЦКБ) АН БССР. За все годы работы создано 22 лидара различного назначения для работы в лабораторных условиях и открытом воздухе, с автомобиля, борта корабля и самолета. С крыши Института физики осуществляется зондирование загрязнения г. Минска, из помещения – профиля концентрации аэрозоля и озона до высоты 40 км.

В основном лидары измеряют концентрацию аэрозоля, хотя некоторые из них – и газовых компонент. Особо отметим следующие.

*«Глория – М»* [13]. Это лидар на растворах красителей сложных молекул, созданный в начале 1980-х гг. «Накачкой» в нем является одновременное облучение рубиновым лазером шести разных растворов, в которых возникает генерация на шести частотах. Кроме того, в атмосферу запускается излучение на длине волны 532 нм (удвоенная частота Nd: YAG лазера). Таким образом, осуществляется одновременное освещение неустойчивой во времени среды излучением видимого диапазона на семи длинах волн, что позволяет с большой точностью восстанавливать распределение частиц аэрозоля по размерам. Такого многочастотного лидара пока нигде не создано.

*Озоно-аэрозольный лидар* [14]. Три излучателя лидарного комплекса формируют зондирующее лазерное излучение на пяти длинах волн: 281,7; 308; 355; 532 и 1064 нм. Лидарные сигналы на длинах волн 281,7 и 308 нм используются для расчета профиля концентрации озона в нижнем слое тропосферы начиная с 0,1 км, а сигналы на длинах волн 308 и 355 нм – в стратосфере. Характеристики аэрозоля измеряются с использованием излучения с длинами волн 355, 532 и 1064 нм. Интервал высот 0,1–40 км.

*Многоволновая лидарная система с рамановскими каналами* [14]. Кардинальными задачами при ее создании были разработка многоволнового излучателя, многоканальной оптической приемной системы и фотоприемных модулей. Многоволновый излучатель посылает в атмосферу одновременно три световых импульса по одной трассе зондирования на длинах волн 355, 532, 1064 нм. Многоканальная оптическая приемная система представляет собой семиканальный оптический анализатор, предназначенный для регистрации излучения на длинах волн 1064, 607, 532 (всего и деполаризованного сигнала), 407, 387, 355 нм. Фотоприемные модули включают фотоприемный

датчик (фотоумножитель или лавинный фотодиод), усилитель, аналого-цифровой преобразователь (для регистрации в аналоговом режиме) или дискриминатор/счетчик импульсов (для регистрации в режиме счета фотонов). По результатам экспериментов восстанавливаются профили показателя обратного рассеяния, показателя ослабления, степени деполяризации рассеянного аэрозолем света. По измерению комбинационного (рамановского) рассеяния на азоте на длине волны 387 или 607 нм и паров воды на длине волны 407 нм определяются профили концентрации азота и влажности.

Разработано много новых методов обработки лидарных сигналов. Остановимся только на одном из них. Это метод совместной обработки данных лидара и CIMEL [15]. В существующей мировой радиометрической сети AERONET [16] с помощью радиометра CIMEL по ослаблению солнечной радиации определяется спектральная аэрозольная оптическая толщина всей атмосферы. С помощью многоспектрального лидара определяется концентрация аэрозоля на всех высотах, что позволяет также рассчитать оптическую плотность. Нами предложен алгоритм совместной обработки данных. Он дает возможность найти при выбранной аэрозольной модели атмосферы и функции правдоподобия не только профиль общей концентрации, но и концентраций мелкой и крупной фракций.

Дистанционная идентификация типа аэрозоля позволяет проследить процесс распространения взвешенных частиц и определить источники выбросов. Как показали результаты натуральных измерений, в большинстве случаев в атмосфере образуется неоднородное по высоте распределение аэрозолей различных типов: дымов, пыли, индустриального аэрозоля, капельных и кристаллических частиц в облачных образованиях. Признаки, по которым производится идентификация частиц аэрозоля, представлены в таблице. Как видим, только дым и индустриальный аэрозоль нельзя различить по рассеянному свету, поэтому необходимо привлекать дополнительную информацию.

Таблица. Признаки идентификации частиц аэрозоля

Тип аэрозоля	Размер, мкм	Форма	Спектр обратного рассеяния пропорционален $\lambda^{-A}$	Деполяризация, %
Дым и индустриальный аэрозоль	Меньше 1	Разная	$A \sim 1$	1–5
Пылевые частицы	1–20	Несферические	$A \sim -0,4-0$	8–20
Частицы капельных облаков	Много больше 1	Сферические	$A \sim 0$	0
Кристаллические облачные частицы	Много больше 1	Разные типы кристаллов	$A \sim 0$	20–40

Перейдем к рассмотрению некоторых примеров зондирования атмосферы.

**Контроль загрязнения промышленного и достаточно чистого регионов в Беларуси.** Посредством лидарной технологии были проведены исследования загрязнения пограничного слоя атмосферы в фоновых (относительно чистых) и промышленных регионах Беларуси. В качестве фонового региона был избран Березинский биосферный заповедник, в качестве промышленного – Солигорский комбинат калийных удобрений. В рамках комплексного экологического обследования Солигорского региона лидарным методом проведено исследование пылевого загрязнения воздуха в городе. Возможности измерения концентрация выбросов из производственных труб были реализованы с помощью следующей схемы. При наличии ветра распространение дымового шлейфа из трубы совпадало с направлением распространения ветра. Лидар, установленный на определенном расстоянии от трубы, осуществлял зондирование воздуха в вертикальной плоскости, которая располагалась перпендикулярно направлению ветра и была, относительно него, перед трубой и за ней. Разность количества рассчитанной по определенной методике взвеси в этих двух плоскостях соответствовала выбросу трубы в единицу времени.

**Аэрозольное загрязнение г. Минска.** Планом мероприятий Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь по организации наблюдений за содержанием взвешенных в воздухе частиц предусматривалось размещение в г. Минске локальных датчиков для измерения концентрации аэрозоля. С этой целью в течение нескольких лет нами с помощью панорамного лидара изучался характер распределения аэрозоля на территории города. Из анализа профилей концентрации аэрозольных частиц в тропосфере следует, что основная масса аэрозоля над городом сосредоточена в пограничном слое атмосферы с верхней границей



на уровне 3–4 км. Высота слоя имеет суточный и сезонный ход. Наблюдается повышение концентрации аэрозоля в нижней атмосфере в дневное время и расширение слоя загрязнения в послеполуденный период. Эти особенности обусловлены усилением турбулентного перемешивания днем при нагреве подстилающей поверхности. Выяснено, что среднее по выборке измерений распределение объемов частиц имеет двухмодовую структуру с граничным диаметром между модами 1 мкм. Общее содержание малых (меньше 1 мкм) и крупных (больше 1 мкм) частиц, а также их концентрации в нижнем слое атмосферы являются слабо коррелированными. Средние по городу концентрации малых и больших частиц в приземном слое составили 20 и 22 мкг/м<sup>3</sup> соответственно. Санитарные нормы устанавливают среднесуточную ПДК равную 150 мкг/м<sup>3</sup>. На основании построенных карт выяснены районы повышенной и пониженной загрязненности. Конкретные зоны превышения (понижения) концентраций больших и малых частиц не совпадают. Большой неоднородностью отличаются пространственные распределения крупных частиц.

**Аэрозольное загрязнение стратосферы вулканом Пинатубо.** Примером серьезных изменений в состоянии стратосферы вследствие природных катастроф являются крупные извержения вулканов. Так, в июне 1991 г. на Филиппинах произошло мощное извержение вулкана Пинатубо. Динамика высотного распределения параметра  $R(h)$ , характеризующего концентрацию стратосферного аэрозоля в течение нескольких лет, приведена на рис. 1. Через месяц после извержения над Минском были зафиксированы первые признаки замутнения стратосферы, которое стало быстро нарастать. В начальный период аэрозольный слой формировался на высоте порядка 15 км. Затем он распространился до высот 25–27 км. В конце 1991 г. и на протяжении всего 1992 г. его основная масса была сосредоточена в интервале высот 16–21 км. В это время количество аэрозоля в стратосфере над территорией Беларуси было в 50–100 раз больше, чем в период спокойного состояния. С февраля 1992 г. наблюдалось уменьшение величины и снижение положения максимума  $R(h)$ . К 1995 г. содержание аэрозоля пришло к фоновому значению. Подобные карты распределения были получены не только для концентрации, но и для размеров и форм частиц. О размерах можно было судить по отношению показателей обратного рассеяния на длинах волн 1,06 и 0,53 мкм; о форме – по величине степени деполяризации отраженного слоя света (рост деполяризации указывает на то, что частицы перестают быть жидкокапельными, т. е. сферическими). В конце 1991 г. крупные частицы наблюдались на высотах более 20 км. Одновременно здесь же регистрировались несферические частицы. Совокупность данных факторов может объясняться присутствием вулканического пепла в стратосфере. Однако уже через несколько месяцев несферические частицы исчезли, что связано с процессом седиментации крупных несферических частиц. В дальнейшем происходила перестройка распределений частиц по размерам. Крупнодисперсная фракция сосредоточивалась в нижнем слое, и наблюдался процесс очищения стратосферы.

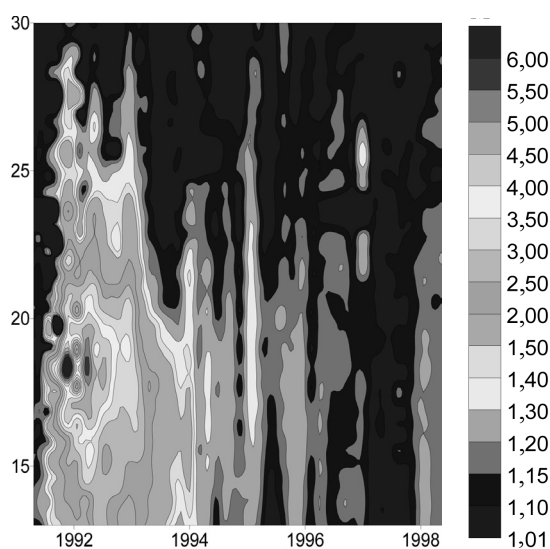


Рис. 1. Трансформация высотного распределения содержания аэрозоля (в условных единицах) в регионе Беларуси после извержения вулкана Пинатубо

**Контроль высотного распределения озона в атмосфере.** Наряду с аэрозолем ученых привлекает и исследование содержания озона в атмосфере. Это объясняется тем, что, с одной стороны, стратосферный озоновый слой является щитом, который оберегает все живое на Земле от губительного коротковолнового излучения из космоса. С другой стороны, озон – это яд, по своим характеристикам сопоставимый с ядами группы цианидов. С этой точки зрения он классифицируется как загрязняющее вещество, и повышение его концентрации в промышленной или жилой зонах опасно для человека в силу перечисленных аспектов, поэтому существует необходимость проведения всестороннего и детального мониторинга атмосферного озона. Лидарные станции занимают в системе такого мониторинга одну из ключевых позиций, что обусловлено их способностью получать с высоким разрешением информацию о профилях высотного распределения озона и, следовательно, давать возможность выделять в изменениях общего содержания озона вклад стратосферного слоя, где определяющую роль играют факторы глобального масштаба. В настоящее время в разных точках земного шара работает много озоновых станций, оборудованных лидарными системами. В Беларуси в Институте физики озоновый лидар введен в действие в 1998 г. В настоящее время используется усовершенствованный озоно-аэрозольный лидар, описанный выше. Методика, алгоритм и программное обеспечение для расчета профилей концентрации озона основаны на измерении отношения вертикальных профилей обратного рассеяния в области поглощения озона и вне ее. Результаты исследования динамики профилей концентрации озона в виде пространственно-временной карты представлены на рис. 2. Характерным является формирование повышенных значений максимумов концентрации в весенний период и их уменьшение во втором полугодии. Такая сезонная трансформация озонового слоя обусловлена в первую очередь процессами переноса озона из тропической зоны в средние широты. Интеграл концентрации  $O_3$  по высоте дает величину общего содержания озона в единицах Добсона. Эти значения согласуются с данными, полученными в Национальном научно-исследовательском центре мониторинга озона в г. Минске и космическими измерениями с помощью датчика TOMS.

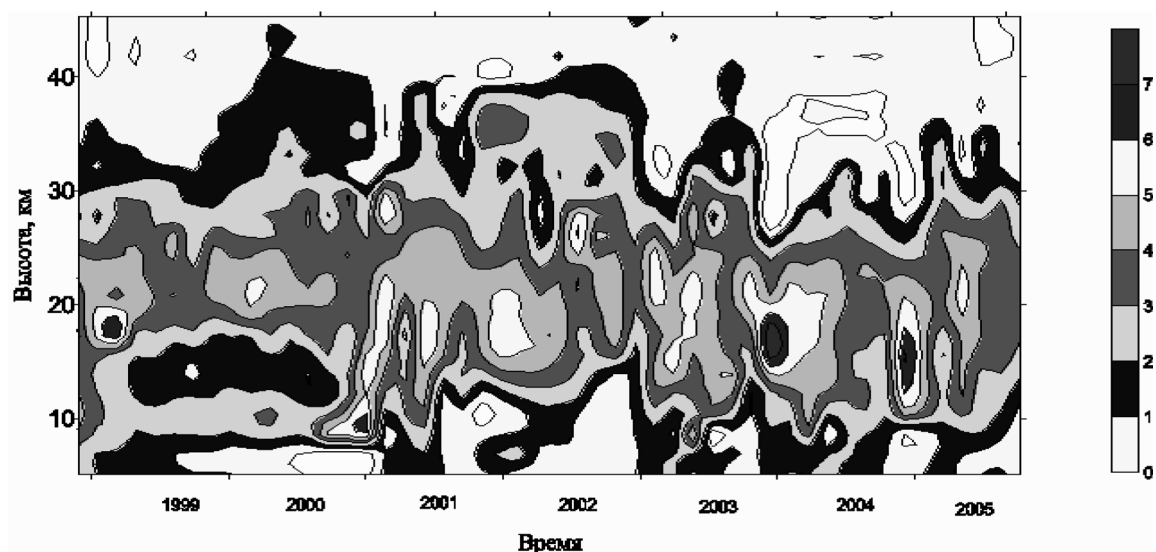


Рис. 2. Временная трансформация высотных профилей концентрации озона за период 1999–2005 гг. (в ед.:  $10^{12}[\text{см}^{-3}]$ )

**Мировые лидарные сети.** Лидарная техника, которая эксплуатируется в разных точках земного шара, будет использоваться более эффективно, если на основе измерений создать единый банк данных загрязнения атмосферы огромных территорий. Это возможно только тогда, когда разные лидарные станции объединены в единую сеть, где осуществлена интеркалибровка приборов и методик и проводится мониторинг состояния атмосферы по общим для всех правилам. Первая попытка создания такой сети была предпринята еще в середине 1980-х гг. для осуществления мониторинга по заданию Госкомгидромета СССР. В Институте физики и ЦКБ АН Беларуси была создана сеть стратосферных лидаров (контролирующих антропогенные и вулканические

загрязнения атмосферы, а также озоновые дыры), которые и теперь работают в разных странах СНГ, а также на Кубе и в Польше. Однако в более масштабных размерах в 2000 г. была образована Европейская лидарная сеть EARLINET [17], объединяющая в настоящее время 24 ведущих центра из 13 европейских стран. Одним из организаторов сети выступал Институт физики НАН Беларуси. Получив определенный организационный опыт, он проявил инициативу по созданию на территории бывшего СССР также (уже новой) лидарной сети CIS-LiNet [18], которая стала функционировать с 2006 г. в тесной связи с лидарными сетями Европы и Юго-Восточной Азии. Сеть включает 7 лидарных станций на пространстве от Минска до Владивостока. В ней унифицированы лидарное оборудование и программные пакеты для обработки данных. В процессе мониторинга исследуются пространственно-временные тренды и циклические изменения параметров тропосферного и стратосферного аэрозоля, а также стратосферного озона в различных геофизических регионах СНГ. Описанные выше Многоволновая лидарная система с рамановскими каналами и метод совместной обработки данных лидара и CIMEL являются рекомендуемыми в сетях EARLINET и CIS-LiNet. В настоящее время организована Мировая лидарная сеть GALION.

Наличие лидарных сетей принципиально расширяет круг решаемых проблем, связанных с исследованиями крупномасштабной изменчивости атмосферных компонентов и их переноса по земному шару. Это статистические методы анализа данных наблюдений совместно с результатами моделирования переноса воздушных масс, которые позволяют строить карты пространственного распределения источников выбросов, оценивать аномальные загрязнения атмосферы и их причины. Приведем несколько примеров.

**Контроль пылевых бурь из Африки.** В большинстве случаев возмущения параметров аэрозоля в средней и верхней тропосфере вызваны выносами пыли из пустыни Сахара. Это явление носит повторяющийся характер, и его последствия обнаруживаются во всем Европейском регионе. Из рассмотрения данных лидарной сети EARLINET следует, что **обогащенные пылью в северных районах Африки воздушные массы обычно проникают на территорию Беларуси через Средиземноморье, Южную, Западную и далее – Восточную Европу. Реализуется также перенос пыли через районы Ближнего Востока и Украину. В Средиземноморском регионе пыль концентрируется на высотах порядка 1–3 км. В процессе распространения на Восточноевропейский регион пылевой слой поднимается до уровня тропопаузы и сосредотачивается на высотах 6–10 км. Оптическая толщина пылевого слоя составляет 0,2–0,5, в отдельных случаях наблюдаются оптически толстые слои до 1,0. Отличительным признаком существования пылевого слоя является деполяризация лидарного сигнала в диапазоне 0,08–0,15, возникающая вследствие неоднородности частиц такого аэрозоля.**

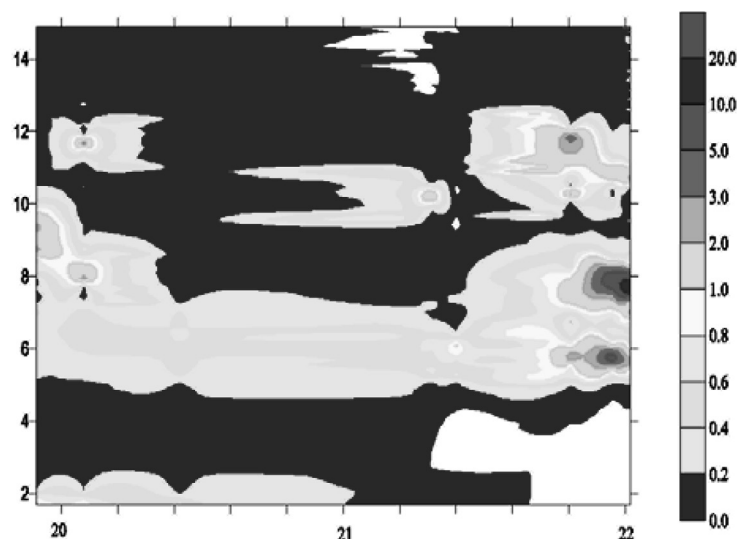


Рис. 3. Трансформация высотного профиля концентрации пыли (до 14 км) в условных единицах в результате инъекции сахарской пыли (30.08.2001 г. с 20.00 до 22.00)

Наблюдаемые явления иллюстрирует рис. 3. Согласно данным Германской службы погоды, 3 августа 2001 г. на высоте 5–10 км над г. Минском проходили воздушные потоки, зародившиеся 3 дня тому назад над пустыней Сахара и поднявшие там пыль. Лидарное зондирование показало, что на этих высотах действительно наблюдаются пылевые облака. Это подтверждают и поляризационные исследования: степень деполяризации света, отраженного с указанных высот, резко возрастает вследствие того, что частицы имеют сложную структуру.

**Контроль за распространением дымов пожаров.** В летний сезон в регионе Беларуси одним из основных источников загрязнения атмосферы являются лесные и торфяные пожары как в самой республике, так и в западных районах России и в Украине. Наиболее сильное дымовое загрязнение в г. Минске наблюдалось в сентябре 2002 г. (рис. 4). Как видим, в начале месяца мутность воздуха нарастала, достигла максимума 10 сентября, а в последующие два дня воздух стал очень чистым. Лидарные измерения показали, что смог поднимался до высоты 1–1,5 км. В эти дни данные радиометра CIMEL свидетельствовали о наличии большого количества мелкодисперсной непоглощающей аэрозольной фракции. Это говорило о том, что основным источником загрязнения были пожары в стадии тления. Рассчитанные траектории переноса воздушных масс показывали, что основные источники загрязнения для Минска находились на территории республики. 11 сентября потоки воздуха из Арктики достигли Беларуси, опустились с больших высот в приземные слои и вытеснили смог.



Рис. 4. Аэрозольная оптическая толщина атмосферы в первой половине сентября 2002 г. на длине волны 440 нм

В 2006–2007 гг. при участии научных групп из Польши, Франции, Норвегии, России и других стран нами были изучены не только распространения дымов пожаров на большие расстояния, но и трансформации взвешенных частиц при их переносе с использованием космических, лидарных, радиометрических и модельных методов. При распространении дымов из зоны Украины к Шпицбергену наблюдалась следующая картина. Функция распределения частиц по размерам имела 3-модальный вид. Средний радиус частиц мелкодисперсной фракции (мода 1) слабо уменьшался в процессе распространения от Минска в полярную зону Шпицбергена. Самая крупная мода там отсутствовала. Крупнодисперсная фракция формировалась в нижнем слое атмосферы. Изменения мелкодисперсной и крупнодисперсных мод не коррелировали. Увеличился параметр, характеризующий поглощательную способность аэрозоля, что связано с уменьшением содержания сажи в частицах. Представленные данные могут быть объяснены процессом седиментации крупнодисперсной фракции, содержащей сажу, в процессе распространения взвешенных частиц.

**Загрязнения, обусловленные антропогенной деятельностью.** Остановимся на влиянии производственной деятельности человека в окружающих нас регионах на примере переноса на территорию Беларуси. Исследование воздействия крупномасштабного переноса на характеристики аэрозоля в Европейском регионе было проведено на основе результатов измерений в Европейской лидарной сети EARLINET. Для изучения высотной трансформации параметров аэрозоля были отобраны данные лидарных наблюдений в сети EARLINET на следующих станциях.

*Aberystwys (52N, 4W)* – крайняя северо-западная станция сети EARLINET на побережье Англии. При западном переносе для нее характерна минимальная степень наличия техногенных



воздействий. Результаты измерений станции рассматриваются как фоновые – реперные для сравнения с данными измерений в других регионах.

*Palaiseau (49N, 2E)* – станция, которая находится в юго-западном направлении от Парижа. При западном переносе она предшествует первому индустриальному Парижскому региону.

*Belsk (51N, 20E)* – станция, расположенная южнее Варшавы в лесной зоне, без источников индустриальных выбросов в окрестной зоне.

*Minsk (53N, 27E)* – станция Института физики имени Б. И. Степанова НАН Беларуси.

На рис. 5 приведены результаты обработки наблюдений в летний период при выраженном западном переносе, охватывающем Европейский регион [19]. Наблюдается рост параметров мутности атмосферы при переходе от западных регионов к восточным, лишь в Беларуси замутненность несколько уменьшается. Минимальная аэрозольная нагрузка на всех высотах реализуется в районе реперной станции Aberystwys. В районе станции Palaiseau в слое до 2 км содержание аэрозоля несколько возрастает. Аэрозольная нагрузка и оптическая аэрозольная толщина атмосферных масс после пересечения пространства Европы в Бельске и Минске существенно увеличивается (до пяти раз).

Особенностью изучения аэрозольного загрязнения атмосферы в последнее десятилетие является комплексность используемых средств и методики комплексной обработки данных дистанционных и локальных измерений. Дистанционные измерения включают в себя не только лазерное зондирование, но и радиометрическое и аэрокосмическое. Идея радиометрического зондирования основана на спектральном измерении прямого и рассеянного под разными углами солнечного излучения, позволяющем определять прозрачность атмосферы и среднее по ее толщине содержание компонент среды. Идея аэрокосмического зондирования базируется на измерении теплового излучения атмосферы, подстилающей поверхности или рассеянного ими солнечного света с борта самолета или спутника. Локальные измерения содержатся в сети ЕМЕР, Березинском биосферном заповеднике, для регионов Польши доступны в сети Интернет в оперативном режиме. Процедура наблюдений предусматривает также систематический анализ прогностических моделей переноса частиц NAAPS, DREAM, UOA с целью оценки вероятности возникновения эпизода выноса аэрозольного загрязнения в регион Беларуси. Такой подход обеспечивает систематический многолетний мониторинг загрязнения атмосферы, позволяет определять состав аэрозольных компонент, их пространственно-временную изменчивость, находить источники выбросов.

Информация о пространственных распределениях параметров атмосферных компонентов составляет основную ценность результатов космических измерений. Космические лидары в силу очевидных технических ограничений не могут достигнуть такого качества данных, которая доступна на стационарных лидарных станциях. Поэтому наземные лидарные станции призваны обеспечить валидацию результатов космических лидаров. Начиная с 2006 г., когда был запущен спутник CALIPSO, осуществляется международный эксперимент по валидации данных спутни-

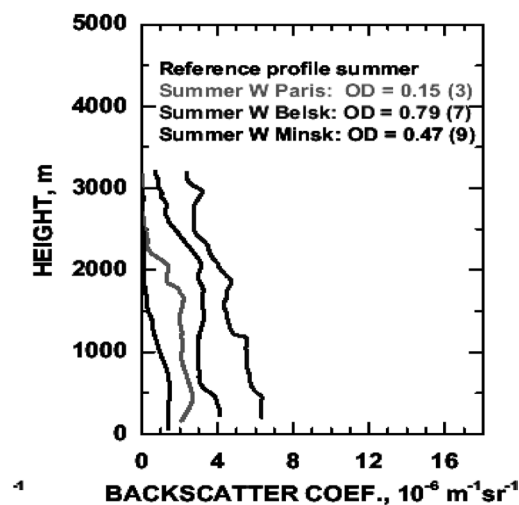


Рис. 5. Средние вертикальные профили показателя обратного рассеяния летом при западном переносе через пространство Европы на станциях: Aberystwys, Palaiseau, Belsk, Minsk (вверху указаны оптическая аэрозольная толщина (OD) и число измерительных дней)

ковых измерений и сопоставления их с результатами наземного зондирования на станциях лидарной сети EARLINET (в том числе и в Институте физики). На основании статистического анализа результатов совместных наземных и космических лидарных измерений были сделаны оценки разностей сигналов обратного рассеяния. Результирующее распределение относительных разностей (CALIPSO-EARLINET)/EARLINET (%) характеризуется следующими параметрами: среднее отклонение (относительное) составляет 4,6 %, относительное стандартное отклонение – 50 %, медиана – 0,6 % (<http://www-calipso.larc.nasa.gov/products/>).

Следует отметить, что помимо работ, выполненных указанным ранее коллективом, научная группа Института физики в составе В. В. Чуракова, В. О. Петухова, В. А. Горобца занималась исследованием возможности использования ИК-лазеров для зондирования газового состава атмосферы. С этой целью был разработан и создан комплекс аппаратуры на основе мощного TEA CO<sub>2</sub>-лазера с широкой перестройкой по спектру (9,0–11,4 и 4,5–5,7 мкм) и CO<sub>2</sub>(CO)-лазеров низкого давления с продольным разрядом (в том числе и многоволновых), которые использовались в составе лидаров в Томске и Минске. Предложены методики измерения концентрации двуокиси серы, закиси азота, окиси углерода, паров воды и т. д., а также обнаружения мест утечек природного газа из трубопроводов путем контроля содержания этана в атмосфере. По ряду организационных причин эти наработки не получили дальнейшего практического развития.

Независимо от Института физики имени Б. И. Степанова НАН Беларуси лазерное зондирование атмосферы осуществлялось в Институте прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко в 1970–1980-х гг., где были проведены эпизодические измерения загрязнения Минска, Москвы, Ленинграда. В дальнейшем экспериментальные исследования там прекратились.

## Литература

1. Кузнецов В. В. / Изв. РАН. Сер. 5. 1905. Т. 28, № 4/5. С. 289–298.
2. Кацев И. Л., Иванов А. П. // ЖПС. 1967. Т. 7, вып. 5. С. 714–721.
3. Кацев И. Л., Иванов А. П. // Оптика и спектроскопия. 1968. Т. 24, вып. 6. С. 983–988.
4. Иванов А. П., Кацев И. Л. // Изв. АН СССР. Сер. физика атмосферы и океана. 1967. Т. 3, № 7. С. 714–723.
5. Зеге Э. П., Иванов А. П., Кацев И. Л. Перенос изображения в рассеивающей среде. Минск, 1985.
6. Zege E. P., Ivanov A. P., Katsev I. L. Image Transfer Through a Scattering Medium. Springer-Verlag, 1991. P. 349.
7. Zege E. P., Katsev I. L., Polonsky I. N. // Appl. Phys. B. 1995. Vol. 60. P. 345–353.
8. Зеге Э. П., Кацев И. Л., Полонский И. Н. // Изв. АН СССР. Сер. физика атмосферы и океана. 1998. Т. 34, № 1. С. 45–50.
9. Иванов А. П., Калинин И. И., Козлов В. Д. и др. // Изв. АН СССР. Сер. физика атмосферы и океана. 1969. Т. 5, № 2. С. 212–215.
10. Скрелин А. Л., Иванов А. П., Калинин И. И. // Изв. АН СССР. Сер. физика атмосферы и океана. 1969. Т. 6, № 9. С. 989–899.
11. Fiocco L., Smullin Z. D. // Nature. 1963. Vol. 199, N. 4900. P. 1275–1276.
12. Иванов А. П. Методы лазерного зондирования атмосферы // Квантовая электроника и лазерная спектроскопия. М., 1974. С. 381–407.
13. Ганнушкина Л. Д., Гитлин Е. М., Иванов А. П. и др. // ЖПС. 1984. Т. 40, вып. 4. С. 690–695.
14. Иванов А. П., Чайковский А. П., Орлович В. А. и др. // Тр. III Всеукр. съезда экологов с междунар. участием. Украина, Винница, 21–24 сент. 2011. Винница, 2011. Т. 2. С. 365–368.
15. Chaikovsky A., Dubovik O., Holben B. N. et al. // Optica Pura y Aplicada. 2004. Vol. 37, N 3. P. 3241–3246.
16. Holben B. N., Eck T. I., Slutsker I. et al. // Remote Sens. Environ. 1998. Vol. 66. P. 1–16.
17. Bosenberg J., Ansmann, Baldasano J. et al. // Advances in Laser Remote sensing: Selected papers 20-th International Laser Radar Conference (ILRC). Vichi. France, 10–14 July 2000. [S. 1], 2000. P. 155–158.
18. Чайковский А. П., Иванов А. П., Балин Ю. С. и др. // Оптика атмосферы и океана. 2005. Т. 18, № 12. С. 1066–1072.
19. EARLINET: A European Aerosol Research Lidar Network to Establish an Aerosol Climatology. Report No. 348 / Bösenberg J., Matthias V. Hamburg: Max-Planck-Institut für Meteorologie, 2003.

A. P. IVANOV

## LASER SENSING OF THE ATMOSPHERE OF BELARUS: HISTORICAL SKETCH

### Summary

The history of laser sensing in Belarus is given. Examples of lidar developments of various designations and their applications are considered. The role of the Institute of Physics, National Academy of Sciences of Belarus in the creation of the European and former Soviet-Union lidar networks is emphasized.