

# ЛАЗЕРНОЕ (ЛИДАРНОЕ) ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ В БЕЛАРУСИ

Лазерное зондирование атмосферы (ЛЗА) – это определение ее состава с помощью облучения лазерным лучом, один из эффективных методов решения обратных задач дисперсных сред путем измерения рассеянного света. Приборы, в которых его источником является лазер, называются лидарами. Излучение лазера обладает уникальными свойствами: огромной мощностью, высокой монохроматичностью, когерентностью, поляризацией, малой угловой расходимостью и шириной пучка, возможностью изменять в широком спектральном интервале длину волны и длительность импульса. Это дало толчок к свершению подлинной технической революции в области светового зондирования атмосферы.



Фото Юлии Васильиной

**Аркадий Иванов,**  
главный научный сотрудник  
Института физики НАН Беларуси,  
член-корреспондент,  
заслуженный деятель науки  
Республики Беларусь

Сущность ЛЗА достаточно проста. В атмосферу посылается короткий световой импульс, который в разные моменты времени засвечивает различные секторы пространства (3–10 м). Чем больше время, тем удаленнее засвечиваемый участок. Рассеянное в обратном направлении излучение несет информацию об этом сегменте, а временная развертка регистрируемого приемником сигнала – обо всей трассе зондирования. При сканировании лучом под разными углами или при нахождении лидара на перемещающемся носителе (автомобиле, корабле, самолете, космическом аппарате) получаем сведения о значительно большем пространстве атмосферы.

К достоинствам ЛЗА можно отнести:

- *измерение оптических характеристик атмосферы, определяющих радиационный режим, климат Земли и лежащих в основе оценки подавляющего количества компонентов среды;*
- *определение концентрации в воздухе различных газов естественного и антропогенного происхождения на уровне предельно допустимых концентраций (ПДК) и ниже;*
- *замеры характеристик аэрозоля: концентрации, среднего размера, формы, степени полидисперсности частицы, показателя преломления;*
- *установление направления и скорости ветра, плотности воздуха, давления, температуры, влажности в разных участках атмосферы;*
- *высокое (до нескольких метров) пространственное разрешение измеряемого компонента;*

- *дальность действия – порядка метеорологической дальности видимости (2–30 км) по всему обозреваемому объему пространства;*
- *возможность непрерывного контроля;*
- *экспрессность;*
- *неконтактность (сведения получают с больших расстояний);*
- *исключение возможности возмущающего действия прибора на воздушную среду благодаря дистанционности зондирования;*
- *возможность отследить даже быстро меняющиеся значения параметров атмосферы с помощью большой частоты зондирующего импульса.*

С чем связана возможность определения такого большого количества характеристик? Характер рассеянного света может быть самым разнообразным. Его интенсивность на разных частотах, резонансное и комбинационное рассеяние, доплеровский сдвиг частоты, люминесценция – все эти особенности и используются для исследования атмосферы.

Следует, однако, отметить, что при распространении лазерного излучения в атмосфере возможно возникновение разных физико-химических явлений, в частности электрического пробоя с образованием плазмы при очень большой мощности излучения, что делает невозможным дальнейшее распространение света. С другой стороны, при определенных больших мощностях (но меньших порогового значения для пробоя воздуха) показатели поглощения и преломления среды могут так измениться, что атмосфера в канале распространения луча «просветляется», а сам канал превращается в своеобразный волновод.

При изучении аэрозоля классическими методами (без лазеров) применяются различные приборы, измеряющие концентрацию частиц, их распределение по размерам. В ряде случаев устанавливается химический состав. Концентрация газов измеряется приборами, основанными на разных физико-химических методах. Забор воздуха осуществляется в ограниченный объем рабочей кюветы прибора, в условиях которой можно добиться высокой точности измерений, разработать эталонированные методики, тестировать аппаратуру и осуществлять строгий контроль за состоянием воздуха в ограниченных объемах (в цехах заводов и т.д.). В этом заключаются положительные качества классических методов контроля атмосферы. Однако они имеют большое количество принципиальных недостатков: трудоемкость измерений, длительность обработки пробы, использование для каждого измеряемого компонента своего метода и прибора, малое

количество точек наблюдения, недоступность многих из них (как правило, высотных).

Все это ограничивает возможности осуществления мониторинга загрязнения атмосферы на больших пространствах только классическими методами, поскольку необходим колоссальный объем информации от источников выбросов. Особенно актуален такой контроль в крупных промышленных центрах, при решении проблем трансграничного переноса, экологии, климатологии. И вот тогда на помощь приходят методы ЛЗА.

Лазерное зондирование атмосферы получило в Беларуси широкое развитие. По техническому оснащению, теоретическим разработкам, программному обеспечению, участию в организации международных лидарных сетей, объединению их с другими системами контроля состава атмосферы, внедрению новых принципов анализа состояния воздушной среды в мировое сообщество наше государство заняло одно из ведущих мест в мире. Как и почему это получилось? Поскольку автор статьи имеет определенное отношение к этому, особенно в первоначальной стадии, хотелось бы рассказать о том, как я пришел к проблеме ЛЗА и как она разрабатывалась в дальнейшем.

Естественно, я не думал о лазерном зондировании атмосферы: в те далекие времена и понятия такого не было. Окончил школу в 1947 г. в г. Куйбышеве (ныне Самара) с золотой медалью, поступил в Ленинградский институт точной механики и оптики (ЛИТМО) на инженерно-физический факультет, который окончил в 1953 г. и стал работать в Государственном оптическом институте (ГОИ) в лаборатории красителей, организованной членом-корреспондентом АН СССР Т.П. Кравцем, родоначальником советской школы научной



За работой вместе с коллегой по лаборатории Владимиром Диком



Аркадий Петрович Иванов с сотрудниками лаборатории оптики рассеивающих сред, которой он руководил более 40 лет – с 1964 по 2008 г.

фотографии. В лаборатории велись исследования и разработки адсорбционных пленочных и стеклянных светофильтров. Изучались спектры поглощения красителей, адсорбированных на поверхности адсорбатива или проникших внутрь него. Поскольку в качестве адсорбентов рассматриваются в основном порошкообразные вещества, методика измерения спектров поглощения таких объектов (в отличие от прозрачных) осложнена наличием рассеяния света. Стояла задача использовать диффузный спектральный коэффициент отражения света  $R(\lambda)$  ( $\lambda$  – длина волны) для определения спектра поглощения материала  $k(\lambda)$ . Поскольку теоретических проработок этого вопроса в те годы не было, влияние рассеяния на восстановление  $k(\lambda)$  пытались установить экспериментально. В 1952 г. заведующим лабораторией красителей был назначен Б.И. Степанов. Будучи теоретиком, он решил установить аналитическую связь между коэффициентом отражения порошкообразных материалов и их показателем поглощения. Борис Иванович допустил, что отражение реального светорассеивающего слоя эквивалентно отражению стопой пластинок, толщина которых равна среднему диаметру частиц. Исходя из такой гипотезы, он вместе со своим первым аспирантом О.П. Гириным выяснил аналитическую связь между  $R$  и коэффициентом отражения границы «вещество – связующая среда», показателем поглощения вещества, размером частиц. Сравнение с экспериментальными данными показало хорошее совпадение результатов. Борис Иванович строил серьезные планы по развитию этого направления в ГОИ, однако ему вместе с другими крупными учеными предложили работать в АН БССР, где в 1955 г.

был создан Институт физики и математики, основу которого в 1959 г. составил Институт физики (ИФ). Борис Иванович, увлеченный полученными в ГОИ результатами в области спектроскопии дисперсных сред, первым делом продолжил работы в указанном направлении со своими учениками: Ю.И. Чекалинской, А.М. Самсоном, А.П. Пришивалко.

Ну а чем я занимался в ГОИ? Дипломная работа, которой руководил мой наставник А.С. Топорец, была связана с анализом явления Умова, согласно которому при освещении дисперсной среды поляризованным светом при росте интенсивности отраженного излучения его поляризация обязательно падает. Дальше я задумался над поступлением в аспирантуру и темой диссертации. Случайно разговорился об этом с физиком Н. А. Толстым (прототипом героя повести Алексея Толстого «Детство Никиты» и сыном писателя). А он мне говорит: «Наша промышленность начинает выпускать люминесцентные лампы. Но когда на стекло наносится очень тонкий или толстый слой люминофора, свечение слабое. При определенной толщине – максимальное. Каждый раз приходится находить эту толщину экспериментально. Разработайте теорию вопроса». Я и занялся этим. Используя подходы А.А. Гершуна, Б.И. Степанова, М.М. Гуревича (последний стал моим научным руководителем) по рассеянию света, я развил их дальше применительно к люминесценции, возникающей под действием возбуждающей радиации; подготовил и провел эксперименты на люминесцирующих объектах разной степени дисперсности; защитил кандидатскую диссертацию в 1958 г., оппонентом которой был Б.И. Степанов.

Встал вопрос о дальнейшей работе. Я изучил литературу по теории многократного рассеяния в различных дисперсных средах и обнаружил, что для решения астрофизических задач, где среду считают слабопоглощающей, а индикатрису рассеяния элементарного объема  $x(\gamma)$  ( $\gamma$  – угол рассеяния  $x$ ) близкой к сферической, теория разработана прекрасно. А вот для земных объектов (атмосфера, водная среда, земная поверхность, растительность и прочие биологические объекты, различные материалы) наглядная теория распространения света отсутствует. Трудности связаны с сильной вытянутостью индикатрисы в реальных средах. Кроме того, часто нужно знать не только закономерности распространения широких (о которых шла речь), но и узких пучков света разной временной длительности. В каждой области проводились сходные независимые экспериментальные измерения с выводами, часто похожими друг на друга, но не связанными

между собой. Я задумался: как выйти из этого положения? Помогла сама теория переноса излучения. Если отвлечься от поляризации, то этот процесс в любой дисперсной среде определяют только три оптических параметра. 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  $x(\gamma)$ . С этой точки зрения неважно, какие компоненты содержатся в любой среде, каковы природа и физические процессы, влияющие на 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 величины среды и положение точки наблюдения определяются не размерными, а безразмерными характеристиками. Например, интенсивность света в точке, положение которой в пространстве характеризуется вектором  $r$ , зависит не от этого вектора, а безразмерного вектора  $\epsilon r$ . Нужно сказать, что показатель ослабления фигурирует во всех аналитических соотношениях не самостоятельно, а только в произведении с линейными координатами, имеющими размерность длины. Поэтому в сильномутных объемах (большое  $\epsilon$ ) на малых расстояниях реализуется такое же световое поле, как в слабомутных объемах на больших расстояниях. Следовательно, если, например, взять небольшой аквариум с водой и добавить в нее поглощающий и рассеивающий материал, добившись вышеуказанных оптических компонентов как у изучаемой среды, можно очень легко и быстро, зачастую без дорогостоящих экспериментов (например, экспедиций в море или атмосфере) получить оптическую информацию в этой среде.

Стоит также отметить, что в теории переноса время, как и пространственные координаты, используется не размерное  $t$ , а безразмерное  $\tau = \epsilon vt$ , где  $v$  – скорость света в среде. Поэтому данные по нестационарному рассеянию света, полученные в одной среде, могут быть использованы в другой среде. Такой возможный модельный подход к изучению рассеяния в дальнейшем я наметил для себя. Но что-то меня сдерживало от того, чтобы «окунуться» полностью в проблему рассеяния. Я решил посоветоваться с А.С. Топорцом о возможных направлениях исследований. Он предложил мне обратиться к проблеме, которая всю жизнь интересовала академика С.И. Вавилова: оценить границы применимости основного закона фотометрии – закона Бугера,

в частности, изучить, при каких больших световых потоках он нарушается. Это уже совершенно другая научная тематика – спектроскопия, в которую нужно было вникнуть. То, что было сделано мной в дальнейшем, опиралось на книгу Б.И. Степанова «Люминесценция сложных молекул». В 1958 г. я написал статью «О влиянии больших освещенностей на поглощательную способность сложных молекул». В ней были установлены причины и условия «просветления» вещества, приводящие к нарушению закона Бугера, и возможности возникновения отрицательного поглощения – не ослабления, а усиления излучения. Эти явления можно было наблюдать с разработанными в то время импульсными лампами. Б.И. Степанов с особым интересом воспринял статью, но усомнился в возможности реализации отрицательного поглощения, ссылаясь на работы своего аспиранта В.П. Грибковского по гармоническому осциллятору. У Бориса Ивановича это был редчайший случай ошибочного восприятия материала. Через несколько лет он со своими учениками А.Н. Рубиновым и В.А. Мостовниковым получил на растворе сложных молекул не просто усиление, а генерацию света.

Зная меня много лет, Борис Иванович пригласил работать к себе в Институт физики. Увлеченный возможностями, которые передо мной открывались, я дал согласие и в августе 1959 г. переехал в Беларусь. В 1964 г. я возглавил лабораторию оптики рассеивающих сред. Решил заниматься вопросами как нелинейной оптики (нарушением закона Бугера), так и рассеяния света. По первой проблеме над приобретением техники и подготовкой объектов работали А.Л. Скрелин и П.Я. Ганич. Затем подключился А.Н. Рубинов, который впоследствии стал соавтором создания лазеров на красителях. После появления лазеров сотрудница нашей лаборатории Э.П. Зега занималась теорией рассеяния возбуждающего света и люминесценции в мутных средах с учетом нелинейных эффектов. Как частный случай, сформулировала обобщенный закон Бугера.

По второй проблеме мои сотрудники И.Д. Шербаф, К.Г. Предко, Г.К. Ильич, С.А. Макаревич, П.Я. Ганич стали создавать модельные среды, в которых можно изменять характеристики рассеяния и поглощения, специальные кюветы (аквариумы) для исследования световых полей. Это позволило получить информацию об общих закономерностях рассеяния, особенностях пространственной и угловой структуры излучения на больших глубинах, изучить рассеяние узких пучков света с малой угловой расходимостью, рассмотреть поляризацию при

многократном рассеянии. В дальнейшем, опираясь на этот материал, сотрудники лаборатории стали заниматься проблемами, связанными с рассеянием света в разных средах: фотометрических экранах (К.Г. Предко), биологических объектах (А.Я. Хайрулина), фотоматериалах и жидкокристаллических системах (В.А. Лойко). Все они стали докторами физико-математических наук. В связи с появлением лазеров, обладающих рядом ранее перечисленных уникальных свойств, встал вопрос о возможности использования таких источников света в морской воде для решения проблем передачи информации, связи, локации, видения. Было получено постановление Совета Министров СССР о выполнении Институту физики АН БССР задания по изучению распространения лазерного излучения в водной среде. Выполненной лабораторией работе приемной комиссией (руководитель – профессор Г.В. Розенберг) была дана высокая оценка. Результатом стала рекомендация о необходимости создания научного корпуса с лабораторным оптическим бассейном (вместо аквариумов). В этом бассейне, введенном в эксплуатацию в 1969 г., в дальнейшем было проведено много исследований по моделированию распространения света (в том числе лазерного излучения) в океане. Такого уникального объекта больше не удалось построить нигде.

Одна из слабо изученных задач, решением которой я собирался заниматься, – нестационарное рассеяние света, то есть временное распределение интенсивности света в пространстве, порожденное коротким импульсом. Частной задачей являлось зондирование атмосферы (или воды) световым лучом. Возникновение этой идеи относится к началу XX в., когда В.В. Кузнецовым была опубликована работа по определению высоты облаков ночью с помощью прожектора. В 30–50 гг. в Советском Союзе и за рубежом проводились немногочисленные исследования стратифицированной атмосферы с помощью стационарных и импульсных источников в поляризованном и естественном свете. Однако их несовершенство затрудняло широкомасштабную реализацию указанной идеи. Одним из уникальных свойств появившегося лазерного излучения стала возможность создания сверхкоротких импульсов при их большой мощности. Это открывало принципиально новые условия изучения состава атмосферы или воды и переориентировало нас на использование нового светового источника. Таким образом, случайное желание одновременно заниматься нестационарным рассеянием света и влиянием мощного излучения на его распространение в среде ока-

зало большое влияние на быстрое развитие методов и техники ЛЗА в республике.

Первые эксперименты по лазерному зондированию проводились нами в воде. Сотрудниками И.Д. Шербаф, А.Л. Скрелиным, В.Д. Козловым, И.И. Калининым была сделана оптическая водная скамья в виде соединенных между собой трех 12-метровых труб с наваренными на них рельсами. По рельсам перемещались два своеобразных рейтера с лазером и приемником. Узконаправленный приемник мог вращаться на  $380^\circ$ . Погружая скамью в воду, можно было изучать пространственно-угловую и временную структуру света. Детальные эксперименты были проведены в 1966 г. на оз. Нарочь.

Лазерное зондирование зарождающегося тумана и его трансформация во времени наблюдались нами на Звенигородской станции Института физики атмосферы АН СССР в 1967 г. Это было первое лазерное зондирование атмосферы в СССР. (В мире оно было осуществлено на рубиновом лазере Г. Фиокко и Л.Д. Смуллинским в 1963 г.)

Впервые методом многоволнового поляризационного лазерного зондирования нами был проведен длительный цикл исследований спектров оптических характеристик и микроструктуры аэрозоля в нижней атмосфере в большинстве географических регионов бывшего СССР и Мирового океана. Измерения осуществлялись как с наземных лидарных станций, так и с борта 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.

В 1974 г. группу лазерного зондирования возглавил кандидат физико-математических наук Анатолий Павлович Чайковский, который в 2008 г. принял руководство моей лабораторией. Широкий круг научных теоретических и экспериментальных задач рассматривал В.Н. Щербаков. В частности, он исследовал нестационарное рассеяние не только в слабомутных, но и в плотных дисперсных средах. В последнем случае эквивалентом короткой длины импульса являлась малая длина монохроматичности света. 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, А.И. Колесник. Радиоэлектронную аппаратуру разрабатывал А.С. Слесарь, а программное обеспечение – С.В. Денисов. Конструкторская документация

подготавливалась в разное время К.Н. Дятловым, Л.В. Николаевым, Е.В. Рыбальченко, Л.А. Бондарчиком. Большую помощь в создании лидаров оказало Центральное конструкторское бюро АН БССР.

За все годы создано около 30 лидаров разного назначения для работы в лабораторных условиях и на открытом воздухе, на автомобиле, корабле, самолете. С крыши Института физики осуществляется зондирование загрязнения атмосферы г. Минска, из помещения – профиля характеристик аэрозоля, концентрации озона и ряда парниковых газов до высоты 40 км. Особо следует отметить регулярное, с 2012 г., ЛЗА с помощью двух лидаров в прибрежной зоне Антарктиды на российской станции «Молодежная», в районе г. Вечерняя, где сейчас построена Белорусская антарктическая научная станция. Первые эксперименты там выполнял М.М. Король. Получен большой материал по оптическим свойствам атмосферы континента. Для круглогодичных измерений в Антарктиде в разных условиях создан многоволновый поляризационно-рамановский контейнерный лидар с фотоприемными модулями четырех типов.

Лидарная техника будет более эффективно использоваться, если сформировать единый банк данных загрязнения атмосферы по огромным территориям. Это возможно при объединении отдельных лидарных станций в единую сеть с интеркалибровкой приборов и методик, проведением мониторинга по общим правилам. Первая попытка создания сети была предпринята еще в середине 1980-х гг. Сеть стратосферных лидаров, контролирующая антропогенные и вулканические загрязнения атмосферы, «озоновые дыры», работала в разных странах СНГ, в Польше, на Кубе. Европейская лидарная сеть EARLINET в 2000 г. объединила 24 ведущих центра на территории 13 государств. Одним из организаторов данного проекта был Институт физики. В 2017 г. EARLINET была трансформирована в комплексную региональную сеть мониторинга атмосферы. ИФ инициировал создание на территории бывшего СССР новой лидарной сети CIS-LiNet (функционирует с 2006 г. в тесной связи с сетями Европы и Юго-Восточной Азии). Проект включает 7 лидарных станций от Минска до Владивостока с унифицированным оборудованием, программными пакетами 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.

С целью увеличения возможностей лидарной техники была создана многоволновая лидарная система с рамановскими каналами, внедренная не только в Беларуси, но и в ряде стран в сетях EARLINET и CIS-LiNet. Ее кардинальными задачами стали разработка многоволнового излучателя, многоканальной оптической приемной системы и фотоприемных модулей. Многоволновый излучатель посылает в атмосферу одновременно 3 световых импульса по одной трассе зондирования. Приемная система представляет собой 7-канальный оптический анализатор, предназначенный для регистрации излучения на разных длинах волн. Фотоприемники включают в себя датчик, усилитель и аналогово-цифровой преобразователь для регистрации в аналоговом режиме или дискриминатор (счетчик импульсов) для регистрации в режиме счета фотонов.

Существует принципиально другая мировая сеть AERONET для регистрации загрязнения атмосферы аэрозолем, включающая около 400 станций. В ней с помощью радиометров фирмы CIMEL по ослаблению солнечной радиации определяется спектральная аэрозольная оптическая толщина всей атмосферы, что позволяет рассчитать среднюю концентрацию аэрозоля. А.П. Чайковским, который уделял особое внимание комплексному изучению загрязнения и состава атмосферы дистанционными методами (а это не только лазерное, но и радиометрическое и аэрокосмическое зондирование), предложен метод совместной обработки данных лидара и солнечного радиометра, поддержанный учеными разных стран. Это дает возможность найти профили не только общей концентрации, но также мелкой и крупной фракций. Такой метод применяется на многих лидарных станциях.

Информация о пространственном распределении параметров атмосферных компонентов по всему земному шару составляет основную ценность результатов космических измерений, но в силу технических ограничений они не могут достигнуть качества данных, которое доступно на стационарных лидарных станциях. Начиная с 2006 г., когда был запущен спутник CALIPSO, осуществлялся международный эксперимент по валидации спутниковых измерений и сопоставлению их с результатами наземного зондирования в сети EARLINET (в том числе в Институте физики). На основании статистического анализа были сделаны оценки разностей сигналов обратного рассеяния, измеряемых системами.

Идея аэрокосмического зондирования основана на измерении теплового излучения атмосферы, подстилающей поверхности или рассеянного ими

солнечного света. Для получения данных об аэрозоле в нашем центре оптического дистанционного зондирования использованы материалы спектрорадиометра MODIS на спутниках Terra и Aqua, космических агентств США (NASA) и ЕС (ESA). Большим недостатком аэрозольных алгоритмов обработки спутниковых данных, разработанных в Соединенных Штатах, Японии, Германии, Великобритании, является многочасовая обработка даже одного кадра изображения. С целью создания оперативного алгоритма по ее сокращению нашей теоретической группой во главе с Э.П. Зега и И.Л. Кацевым было предложено использовать аналитические решения теории переноса излучения в комбинации с численными расчетами. Идея этого подхода была описана в монографии *Satellite Aerosol Remote Sensing over Land* (Editors A. Kokhanovsky, G. Leeuw Springer). Время обработки кадра – порядка минуты. Величины аэрозольной оптической толщины атмосферы в разных местах, измеренные на земле стандартным прибором CIMEL и восстановленные по разработанным нами и зарубежным алгоритмам, оказались близкими.

В настоящее время предложен новый метод комплексного наземного и спутникового дистанционного зондирования атмосферного аэрозоля, результатом применения которого являются восстановленные пространственные распределения высотных профилей концентраций и оптических характеристик атмосферного аэрозоля в масштабах крупных регионов и атмосферы в целом. Информацию о параметрах взвешенных в атмосфере частиц получают из данных координированных наземных и спутниковых измерений с помощью лазерных и радиометрических систем при их обработке регуляризирующими алгоритмами, разработанными для основных форматов лидарных данных.

В 2017 г. Институтом физики впервые организован и проведен международный комплексный наземный и спутниковый эксперимент LRMC-2017, при котором результатом обработки объединенного массива данных координированных измерений спутникового лидара, наземных станций региональных лидарных сетей и станций глобальной радиометрической сети AERONET стали высотные распределения параметров аэрозольных фракций различных регионов планеты. В эксперименте участвовало 39 научных групп мира.

Помимо работ, выполненных указанным ранее коллективом, в Институте физики группа в составе В.В. Чуракова, В.О. Петухова, В.А. Горобца занималась исследованием возможности зондирования

газового состава атмосферы с помощью ИК-лазеров. С этой целью был разработан и создан комплекс аппаратуры на основе мощного ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазера с широкой перестройкой по спектру (9–11,4 и 4,5–5,7 мкм) и  $\text{CO}_2(\text{CO})$ -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 разработки не были внедрены в практику.

Одновременно с развитием лидарной тематики в ИФ НАН Беларуси лазерное зондирование атмосферы осуществлялось в Институте прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко в 70–80 гг. группой Д.А. Ашкинадзе. Были проведены измерения загрязнения Минска, Москвы, Ленинграда. В дальнейшем экспериментальные исследования прекратились. Ряд методик прорабатывается в Белорусском государственном университете под руководством М.М. Кугейко.

В чем причина успехов методологии лазерного зондирования в Республике Беларусь, которых не было во многих других странах? Институт физики одним из первых в СССР включился в данную тематику благодаря научной заинтересованности и финансовой поддержке со стороны АН СССР, военных ведомств, Госкомгидромета СССР, Космического агентства Советского Союза, экологических организаций, а после 1992 г. – Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Беларуси. Это дало возможность овладеть современными технологиями, позволяющими разрабатывать лазеры различного назначения, в том числе для лидаров. В институте еще с 60-х гг. получили широкое распространение теоретические и экспериментальные работы по оптике и физике атмосферы и океана и их экологическому контролю. Важно и то, что в Беларуси развита оптико-механическая промышленность, электроника – основа лидарной техники; почти одновременно с созданием лазеров здесь велись работы по зондированию атмосферы и воды, сформировались высококвалифицированный научно-технический персонал и солидная материальная база. ■