

## Использование лазеров в ЦАО для исследования атмосферы

**В.М. Захаров, О.К. Костко, В.У. Хаттатов\***

*Центральная аэрологическая обсерватория Росгидромета  
141700, г. Долгопрудный Московской обл., ул. Первомайская, 3*

Поступила в редакцию 11.06.2010 г.

Приведен краткий обзор результатов работ в Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО) по применению лазеров для исследований атмосферы со времени создания первых оптических квантовых генераторов. Рассмотрены основные исторические этапы развития различных направлений атмосферных исследований в ЦАО, в которых лазеры заняли достойное место. В их числе метеорологическая лазерная локация атмосферы, исследования оптических и микрофизических свойств облаков и атмосферного аэрозоля в тропосфере и стратосфере, газоанализ и химия верхней и нижней атмосферы, дистанционное зондирование подстилающей поверхности.

*Ключевые слова:* лазер, лидар, атмосфера, зондирование, оптика; laser, lidar, atmosphere, sounding, optics.

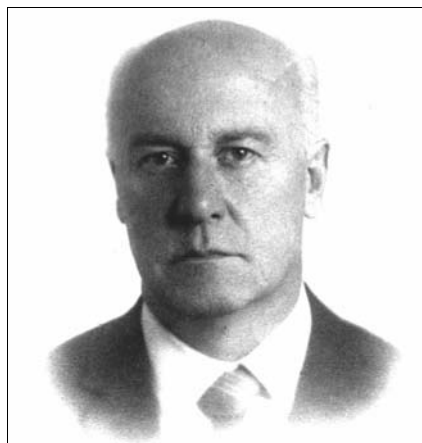
### Введение

Теоретические и экспериментальные исследования атмосферы методами лазерного зондирования были начаты в Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО) практически сразу же после появления твердотельных импульсных лазеров. Центральная аэрологическая обсерватория стала пионером в СССР в этой области исследований. В 1963 г. в ЦАО по инициативе В.Д. Решетова впервые в России были начаты работы по созданию и использованию лидара для зондирования атмосферы. В 1965 г. было завершено создание первого лидара на базе одного из первых серийных квантовых генераторов на рубине. С декабря 1965 г. с его помощью были начаты измерения коэффициентов обратного рассеяния и деполяризации лазерного излучения, рассеянного туманом, дымкой, облаками и другими атмосферными образованиями при зондировании с земли [1].

Более поздние эксперименты показали, что по степени деполяризации отраженного сигнала можно определить фазовое состояние облака, а также исследовать эволюцию образования туманов в атмосфере. Эти работы в дальнейшем имели важное прикладное значение для оперативного определения метеорологической дальности видимости в районе аэропортов.

С 1966 г. начались экспериментальные работы по лазерному зондированию атмосферы и подстилающей поверхности с борта самолета-лаборатории ИЛ-18 (А.Е. Тяботов, В.И. Шляхов, А.Б. Шупяцкий [2]).

Результаты этих работ явились основой для создания в СССР нового направления в дистанционных исследованиях структуры и состава атмосферы. Для проведения работ по применению лазерного зондирования к исследованию атмосферы в ЦАО была создана сначала Лаборатория перспективных разработок под руководством профессора Е.Г. Швидковского в 1965 г., а затем в 1970 г. по инициативе директора ЦАО Г.И. Голышева лаборатория была преобразована в «Отдел лазерных методов исследования атмосферы» (ОЛМИА) под руководством В.М. Захарова. Немалая заслуга в поддержке и развитии перспективных поисковых работ по этому направлению принадлежит профессору физического факультета МГУ Е.Г. Швидковскому, одному из инициаторов и научных руководителей лазерных исследований в СССР.



Профессор физического факультета МГУ  
Е.Г. Швидковский (1910–1970)

\* Владимир Матвеевич Захаров; Олег Константинович Костко; Вячеслав Усеинович Хаттатов (slava.khattatov@gmail.com).

Ведущие научные сотрудники лаборатории Е.Г. Швидковского (Э.А. Чайнова, О.К. Костко, В.Е. Рокотян) стали организаторами новых лабораторий в рамках созданного отдела. Ими и поступившими в отдел молодыми специалистами из ведущих вузов СССР (Ю.А. Борисовым, А.И. Германом, В.П. Гусаровым, В.А. Журавлевой, Г.М. Крученицким, Г.А. Крикуновым, В.И. Павловым, В.С. Портасовым, Н.Д. Смирновым, В.У. Хаттатовым, Ю.В. Холодовым, В.Н. Шулейкиным и др.) были начаты теоретические и экспериментальные исследования по разработке новых методов дистанционного лазерного зондирования атмосферы. Значительный вклад в создание приборной базы лазерного зондирования атмосферы в ЦАО был внесен конструктором В.К. Утенковым. Подробный список публикаций по тематике лазерных исследований приведен в монографиях авторов [2–5].

В начальный период работ в ЦАО были гораздо более оптимистические прогнозы по поводу перспектив и практических применений методов лазерного зондирования в исследованиях микроструктуры облаков и туманов, газового и аэрозольного состава атмосферы и определения термодинамических параметров атмосферы. Дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования показали, что часть надежд оправдалась и лазеры получили широкое применение для изучения оптических и микрофизических параметров тропосферного и стратосферного аэрозолей атмосферы, оптических характеристик туманов и облаков, для дистанционного контроля загрязнений атмосферного воздуха с использованием наземных мобильных и самолетных платформ.

Кроме исследований облачности, связанных с анализом деполяризации обратно рассеянного лазерного излучения, восстановления профиля влажности и концентрации капель в облаках, в ЦАО была начата разработка методов голографического определения параметров жидкокапельных частиц в атмосфере и определения скорости движения облаков. Кратко остановимся на этих исследованиях. По сравнению с существовавшими способами изучения микроструктуры туманов, осадков, облаков и аэрозолей голографический метод является неконтактным и позволяет без искажений определять объемные размеры и формы капель. В ЦАО Л.Н. Разумовым была разработана аппаратура для наземной и самолетной голографии атмосферных аэрозольных частиц и капель [3].

Для регистрации движущихся частиц в исследуемом объеме воздуха было предложено использовать метод импульсной лазерной голографии. Для решения многих методических и технических вопросов в первоначальных лабораторных экспериментах использовалась форсунка, распыляющая капли аэрозоля в исследуемом объеме. На таком генераторе искусственного аэрозоля была проведена голография капель в спектре размеров частиц 10–150 мкм. В дальнейшем начались работы по изучению голографическим методом капель дождя. Для этого была создана лазерная установка, позволяющая производить натурные измерения, и проведена регист-

рация изменений формы дождевых капель от неправильной к сферической при уменьшении размера капель от 300 мкм.

Расчеты и лабораторные эксперименты показали, что минимальный размер частиц или капель, регистрируемый голографическим методом, составляет 1 мкм. Наиболее актуальными применениями голографических методов оказались самолетные измерения капель и кристаллов в облаках с целью изучения формы частиц, определения спектров размеров и исследования связи микроструктуры частиц с прозрачностью атмосферы.

По мере создания более мощных лидаров и усовершенствования систем регистрации стало возможным исследовать профили коэффициента рассеяния и коэффициента деполяризации обратно рассеянного лазерного излучения от атмосферы до стратосферных высот, выявлять аэрозольные слои и определять характеристики аэрозоля и облаков. Это оказалось возможным при некоторых предположениях о коэффициенте преломления частиц и их функции распределения по размерам (О.К. Костко, Э.А. Чайнова [3]). Методы дистанционного зондирования параметров аэрозолей были основаны на использовании различных длин волн лазерного излучения и на зависимости величины коэффициента деполяризации от характера рассеивающего объекта. Деполяризация излучения вследствие рассеяния в облаках вызывается несферичностью частиц и многократностью рассеяния.

Восстановление показателя обратного рассеяния лазерного излучения не являлось конечной целью исследований. Проблемами при зондировании облаков являлись получение высотного профиля показателя рассеяния и последующий переход от показателя рассеяния к физическим характеристикам облаков. Основная трудность состояла в том, чтобы связать измеряемые оптические параметры лазерного излучения с физическими характеристиками исследуемой среды. Например, определить профиль показателя рассеяния  $\sigma(z)$ , вычислить распределения влажности  $q(z)$  и концентрации средних капель  $N_k(z)$  в облаке при априорном предположении, что функция распределения облачных капель по размерам задана, и ряде других упрощающих представлений о свойствах исследуемой среды.

Для восстановления профиля показателя рассеяния было предложено несколько методов: двухуглового зондирования, модифицированный метод последовательных слоев (Г.М. Креков), асимптотического сигнала (В.А. Ковалев). В ЦАО при зондировании облачности использовался метод последовательных слоев, подробно проанализированный в [4]. В настоящей статье анализ результатов, полученных в других организациях, не является целью и здесь не приводится.

На основе вышеперечисленных методических подходов в ЦАО были проведены многочисленные лидарные исследования характеристик атмосферного аэрозоля и облаков, в том числе с борта исследовательского самолета-лаборатории ЦАО ИЛ-18 «Циклон», над различными районами европейской

территории СССР, Сибири, пустыни Каракумы, Дальнего Востока, Северного Ледовитого океана, Каспийского и Черного морей [4].

В связи с созданием лазеров сразу же появился значительный интерес к использованию лидаров для изучения стратосферного аэрозоля. Работы по лазерному зондированию стратосферного аэрозоля были начаты в ЦАО в 70-е гг. Цель этих работ – восстановление распределения показателя аэрозольного рассеяния, а также наблюдения пространственно-временных вариаций этой величины. Информация об этих параметрах представляет практический интерес в проблеме изучения изменений климата вследствие загрязнения стратосферы вулканическим пеплом. В последующие годы лазерное зондирование стратосферного аэрозоля нашло применение во многих национальных гидрометеорологических службах для мониторинга фоновое состояние стратосферного аэрозоля и контроля за распространением вулканического пепла в стратосфере и тропосфере.

Аэрозольные лидары на основе мобильных платформ использовались в ЦАО также для регистрации промышленных аэрозольных загрязнений в нижних слоях атмосферы (на Московском коксогазовом заводе, в некоторых районах г. Москвы перед Московской Олимпиадой-80). Лидарные эксперименты по зондированию атмосферы с последующей корреляционной обработкой данных выполнялись в ЦАО в 1974–1975 гг. В.М. Шулейкиным [4] и в Институте оптики атмосферы (ИОА) СО АН СССР Г.Г. Матвиенко [6]. Измерения в ЦАО проводились на базе Останкинского высотного комплекса с одновременной регистрацией скорости распространения облачности. Результаты, полученные при использовании анемометра и лидара, подробно изложены в [4].

Наконец, рассматривая исследования облачности в ЦАО с использованием лидаров, следует отметить работы по изучению перистой облачности с одновременным применением лидара и ИК-радиометра, проведенные В.А. Журавлевой [7]. Разработанные методы и аппаратура были использованы для определения радиационных характеристик и водности перистых облаков.

Лазерные методы нашли применение для дистанционного определения температуры и влажности атмосферы, они обеспечивают высокое пространственное разрешение, быстроту и высокую частоту измерений. Однако этим методам присущи свои недостатки. Некоторые из них, такие как низкая точность измерений температуры, возможность зондирования в основном в ночное время, оказались временными и с развитием технических средств в последующие годы были устранены. Другие же недостатки, связанные с сильным ослаблением лазерного излучения в облаках и туманах, оказались принципиальными и значительно уменьшают возможности дистанционных измерений температуры. Измерение температуры атмосферы лидарами возможно несколькими способами, которые подробно анализируются в [5]. В экспериментах, проведенных в ЦАО совместно с НПО «Тайфун», применялся метод определения температуры с использованием уравнений состояния

и гидростатики. Измерения температуры рассматриваемым методом оказались корректны в верхней стратосфере, мезосфере и более высоких слоях атмосферы. Весьма важен при измерениях температуры выбор длины волны зондирующего импульса. Подробно обоснование выбора длины волны лазерного излучения рассмотрено в [5].

На основе метода спонтанного комбинационного рассеяния (СКР) лазерного излучения в атмосфере впервые в СССР (в ЦАО) была создана аппаратура для определения профиля концентрации водяного пара в нижней тропосфере. В установках, созданных для этих исследований, применялись оптические квантовые генераторы на рубине, на неодимовом стекле, с использованием основных частот и их гармоник (О.К. Костко, Г.А. Крикунов, В.У. Хаттатов [8]).

Основным недостатком метода являются малые поперечные сечения СКР, ограничивающие высоту измерений приземным слоем воздуха при небольших приемных антеннах лидара и энергиях излучения лазера. Тем не менее сравнительная техническая простота лидара и интерпретации данных оказались определяющими при выборе метода определения концентрации водяного пара в атмосфере.

При использовании метода СКР сигнал обратного рассеяния на парах воды сравнивается с сигналом, обусловленным СКР на молекулярном азоте. В 1973 г. с помощью СКР-лидара ЛР-3М были проведены первые измерения влажности в ЦАО. Здесь же на станции аэрологического радиозондирования ЦАО в г. Долгопрудный регулярно с лазерным зондированием атмосферы запускались радиозонды. Это позволяло сравнивать результаты лазерного зондирования с данными радиозондов [8].

Для изучения загрязненности приземного слоя атмосферы газовыми составляющими В.А. Торговичевым был разработан и создан СКР-лидар ЛР-1К [4]. Лидар – передвижной и был установлен в кузове автомашины ЗИЛ-131. Лидар был использован для измерений концентрации газовых загрязнений в приземном слое атмосферы методом СКР.

Среди пионерских работ, выполненных в ЦАО, необходимо отметить разработку методов и аппаратуры для измерений стратосферного озона [4, 9]. С помощью разработанного в ЦАО лидара дифференциального поглощения, работающего с излучением на длинах волн 295, 305 и 313 нм, группой Н.Д. Смирнова в 1979 г. были проведены первые измерения распределения концентрации озона в верхней тропосфере и нижней стратосфере. В последующие годы на основе теоретических и экспериментальных работ, проведенных в ЦАО, в НПО «Тайфун» была создана автоматизированная лидарная система и начаты регулярные лидарные измерения стратосферного озона [9]. Обобщенные результаты исследований стратосферного озона методом дифференциального поглощения, разработанного в ЦАО, приведены в монографии [4].

Начиная с 1970 г. в ЦАО был проведен цикл работ по исследованию возможностей использования резонансного рассеяния (РР), СКР и дифференциального поглощения лазерного излучения для опре-

деления состава атмосферы. Начались эти работы с расчета поперечных сечений РР на молекулах и ионах азота (О.К. Костко и Э.А. Чайнова [4]), величины которых были необходимы для последующего анализа возможностей измерения состава атмосферы. В дальнейшем был проведен расчет поперечных сечений РР на атомах и ионах Ва. По результатам наблюдений РР можно определить температуру, плотность атмосферы, скорость и направление ветра и концентрации некоторых малых газовых составляющих. Авторы теоретически обосновали предполагаемый лидарный эксперимент по излучению РР на атомах Ва. Результаты этих исследований отражены в монографии [4].

Наконец, следует сказать еще и об исследованиях подстилающей поверхности с использованием наземных и самолетных лидаров, проведенных А.И. Германом, В.Е. Рокотьяном с сотр. [4, 10]. Лидарные измерения параметров подстилающих поверхностей дают сведения о видах и толщине загрязняющих поверхность океана пленок, температуре приповерхностного слоя воды, переносе загрязнителей, высоте ветровых волн. Исследования характеристик отраженного лазерного излучения были проведены в ЦАО авторами работы [10], где в качестве основных информативных параметров были выбраны коэффициент отражения, коэффициент уширения импульса лазерного излучения и степень поляризации.

Анализ результатов исследований степени поляризации, коэффициентов отражения и уширения импульсных сигналов показал, что степень поляризации отраженного излучения от ледяной поверхности, покрытой снегом, пустыни и степи существенно отличается от аналогичной величины для чистого льда и тем более для водной поверхности. Такие эксперименты были проведены в ЦАО при лазерном зондировании морской поверхности с берега, с исследовательских самолетов-метеолабораторий и судов. Информация о характеристиках лазерных сигналов, отраженных от морской поверхности, использовалась для получения сведений о динамике морских волн [4].

В одном из первых экспериментов по использованию самолетных лидаров для определения нефтяной пленки на Каспийском море применялся метод, основанный на измерениях коэффициентов отражения и деполяризации лазерного излучения [4]. Результаты проведенных исследований показали возможность обнаружения нефтяной пленки. Оказалось, что ее отражательные свойства имеют достаточно тесную корреляцию с толщиной нефтяной пленки.

В 70-е гг. были начаты работы по исследованию возможностей использования геофизических лидаров на космических аппаратах с целью получения глобальной информации о характеристиках атмосферы [11]. В ЦАО это направление работ было развито под руководством В.М. Захарова. Авторы совместно с разработчиками лазерного высотомера космического базирования провели цикл теоретических исследований и методических работ по обоснованию возможностей лазерного зондирования параметров атмосферы из космоса. В 1988 г. авторами была опубликована монография [12], посвященная различным аспектам лазерного зондирования атмосферы из космоса. Разработанные лазерные методы и аппаратура дистанционного зондирования были успешно использованы в последующие годы для решения научных и прикладных задач, в том числе в интересах обороны страны. Зав. отделом В.М. Захаров, участвовавший в этом цикле работ, был удостоен Государственной премии СССР в области науки и техники.

К чести сотрудников отдела, работавших в те годы, можно смело сказать, что они были на передовом рубеже как отечественной, так и мировой науки. Это относилось и к вопросам теоретических разработок методов лазерного зондирования, и к геофизическим применениям лазерной аппаратуры. Несколько позже в СССР аналогичные исследования были начаты в Томском государственном университете под руководством В.Е. Зуева. В системе Госкомгидромета ЦАО осуществляла функции головной организации по разработке и внедрению лазерных методов. Выполненные в отделе исследования получили развитие также в ряде других НИУ Госкомгидромета (Институт экспериментальной метеорологии, Институт прикладной геофизики им. Е.К. Федорова, Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова). Исследования атмосферы с помощью лидаров продолжались и в последующие десятилетия.

В 1992–1994 гг. был проведен цикл работ по лазерному зондированию арктической дымки с использованием самолетного лидара в рамках Международного российско-немецкого проекта «Арктическая дымка». Впервые, для различных сезонов года, сотрудниками ЦАО были получены данные о высотных распределениях и оптических характеристиках аэрозолей в тропосфере и нижней стратосфере северных широт в 17 регионах Арктики, относящихся к России, США, Канаде, Норвегии, Гренландии (В.У. Хаттатов [13]).

В последующие годы в ЦАО получили развитие новые направления исследований, связанные не только с созданием лазерных методов дистанционного зондирования атмосферы. В их числе методы лазерной спектроскопии в ИК-области спектра для высокочувствительного газоанализа атмосферных загрязнений. В ЦАО совместно с ФИАН выполнен цикл пионерских исследований по применению диодной лазерной спектроскопии для высокочувствительного газоанализа и исследования состава атмосферы. Были разработаны методы контроля содержания окиси углерода и хлорфторуглеродов (ХФУ-11, ХФУ-12) в атмосфере (В.У. Хаттатов [4]).

Принципиальным отличием от известных ранее спектральных методов атмосферного газоанализа является использование лазерной спектроскопии сверхвысокого разрешения, позволяющей сканировать контуры линий поглощения исследуемых газов, содержащихся в кюветах или на открытых трассах в атмосфере. В ЦАО с использованием методов диодной лазерной спектроскопии впервые в СССР были выполнены измерения содержания окиси углерода, хладона-11, хладона-12 в атмосфере на фоновом уровне.

Были разработаны, изготовлены и метрологически аттестованы два типа образцов трассовых газоанализаторов окиси углерода, предназначенных соответственно для оперативного контроля загрязнения воздушного бассейна городов и промышленных центров, а также для научных исследований по программе фоновой мониторинга атмосферы.

Эффективность созданной газоаналитической аппаратуры была подтверждена на практике для оценки уровней загрязнения атмосферы в ряде крупных городов и промышленных центров СССР и за рубежом (НРБ, ГДР) в 1980–1983 гг. Сотрудниками ЦАО были впервые получены систематические данные о фоновом содержании окиси углерода в атмосфере в ряде биосферных заповедников бывшего СССР (Приокско-террасный, Березинский, Северо-Кавказский). Результаты этих исследований позволили оценить источники окиси углерода в приземном слое атмосферы естественного происхождения, исследовать суточный, сезонный и годовой ход концентрации окиси углерода, дать оценку глобальной концентрации СО в атмосфере средних широт территории СССР. Этот цикл работ выполнялся в ЦАО в 1979–1985 гг. в содружестве с коллективами ученых Академии наук СССР (Физический институт им. П.Н. Лебедева, Институт общей физики, Институт спектроскопии). На основе применения диодных лазеров авторами цикла работ было сформировано новое направление лазерной молекулярной спектроскопии, позволившее на качественно новом уровне решать ряд проблем, имеющих фундаментальное и прикладное экологическое значение. В 1985 г. за создание методов диодной лазерной спектроскопии и их применения коллектив авторов этих работ был удостоен Государственной премии СССР в области науки и техники. В составе лауреатов сотрудник ЦАО В.У. Хаттатов.

Одно из актуальных направлений работ последнего десятилетия в ЦАО было связано с созданием российского высотного самолета лаборатории М-55 «Геофизика» и его применением в исследованиях верхней атмосферы [14]. Разработанные лазерные приборы для зондирования атмосферы заняли достойное место в составе самолетной аппаратуры. На борту самолета-метеолaborатории установлены многоволновые лидары, высокочувствительные лазерные газоанализаторы, лазерные счетчики аэрозольных частиц, многоканальные анализаторы спектров размеров облачных частиц и другая дистанционная и контактная лазерная аппаратура. С 1996 по 2009 г. лазерная аппаратура в составе высотного самолета-лаборатории М-55 «Геофизика» успешно применялась для газоанализа примесей, ответственных за разрушение стратосферного слоя озона в Арктике и Антарктике и в тропических широтах, в исследованиях стратосферного аэрозоля и полярных стратосферных облаков.

В заключение отметим, что в статье не приводятся подробные ссылки на выполненные работы по каждому научному направлению. Все ссылки и не только ссылки, но и подробное обсуждение исследований можно найти в монографиях [3–5, 12]. Ис-

ключение сделано лишь для приоритетных публикаций и нескольких последних работ, которые не вошли в цитируемые монографии авторов. Многие из перечисленных в этой статье исследований, выполненных в ЦАО, были бы невозможны без тесного и дружного общения с учеными научных организаций: Институт оптики атмосферы СО РАН, Институт общей физики РАН, Институт физики атмосферы РАН, Институт прикладной геофизики Росгидромета, НПО «Тайфун» Росгидромета, Главная геофизическая обсерватория Росгидромета, Московский государственный университет, Харьковский институт радиоэлектроники, исследования которых внесли огромный вклад в развитие лазерных методов изучения атмосферы.

Исследователи ЦАО активно участвовали в работе симпозиумов по лазерному и акустическому зондированию атмосферы, международных конференций по лазерным исследованиям атмосферы. Организованный в ЦАО регулярный межведомственный семинар позволил в течение 10 лет заслушать и обсудить более 100 научных сообщений по использованию лидаров для изучения атмосферы.

Исследования в этом направлении начали вести в 70-е гг. XX в. молодые советские ученые; техника создавалась ими буквально на пустом месте, разрабатывались новые лазеры, оптические и радиотехнические устройства, наземные и самолетные лидары. Это было время ученых-романтиков, мечта которых – удачные измерения, интересный доклад или статья о своей работе. Те, кто видел, как лазерный луч уходит в небо, как тонкая зеленая игла лазера на гранате или темно-красная на рубине пронзает воздушный океан, теряясь в космических далах, навсегда запомнили это фантастическое зрелище. Образ стремительного лазерного луча создается в стихах испанского поэта Федерико Гарсиа Лорки, хотя написано они не о лазере:

*Острая звезда – алмаз,  
Глубину небес пронзая,  
Вылетела птицей света  
Из неволи мироздания.*

Оперативные измерения различных параметров атмосферы с использованием лазеров являются конечной целью, к которой стремятся многие исследователи, работающие в этой области, но сегодня нельзя сказать, что эта цель близка. Пройдут еще годы, прежде чем лазерные способы измерения характеристик атмосферы займут столь же прочные позиции, как ставшие традиционными радиозондовые, ракетные и радиометеорологические методы исследования атмосферы. Результаты экспериментальных работ по разработке методов исследования атмосферы значительно отстают от теоретических возможностей. Необходимым условием для дальнейшего продвижения вперед является переход на более высокий технический уровень, позволяющий, например, с помощью одного лазера, работающего на нескольких частотах, или непрерывно перестраиваемого по частоте лазера, собрать и обработать максимум информации, которую приносят сигналы обратного рассеяния

в атмосфере. Более детальные прогнозы дальнейшего развития осложняются не только необходимостью предсказания развития средств лазерной техники, но и возможным пересмотром метеорологических концепций. Обладая новыми возможностями, лазерные методы должны увеличить количество измеряемых характеристик атмосферы и во многих случаях стать основными для изучения атмосферных процессов.

1. Шупяцкий А.Б., Шляхов В.И., Тяботов А.Е. Применение лазерной техники в поляризационных исследованиях метеообразований // Метеорол. и гидрол. 1967. № 2. С. 104–108.
2. Захаров В.М., Костко О.К. Лазеры и метеорология. Л.: Гидрометеониздат, 1972. 61 с.
3. Захаров В.М., Костко О.К. Метеорологическая лазерная локация. Л.: Гидрометеониздат, 1977. 222 с.
4. Захаров В.М., Костко О.К., Портасов В.С., Хаттатов В.У., Чаянова Э.А. Применение лазеров для определения состава атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1983. 216 с.
5. Захаров В.М., Костко О.К., Хмелевцов С.С. Лидары и исследование климата. Л.: Гидрометеониздат, 1990. 320 с.
6. Матвиенко Г.Г. Лазерное зондирование скорости и направления ветра в нижней атмосфере: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск: Институт оптики атмосферы, 1975. 175 с.
7. Журавлева В.А., Калачинский С.Ф., Костко О.К. Совместные ИК-радиометрические и лидарные исследова-

ния радиационных характеристик перистой облачности // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1986. Т. 22, № 1. С. 44–52.

8. Костко О.К., Хаттатов В.У., Крикунов Г.А., Смирнов Н.Д. Определение влажности атмосферы лазерным локатором // Метеорол. и гидрол. 1975. № 12. С. 95–98.
9. Костко О.К., Хмелевцов С.С., Кауфман Ю.Г., Светогоров Д.А., Калугина Г.С. Измерения стратосферного озона двухчастотным лидаром // Оптика атмосф. и океана. 1992. Т. 5, № 4. С. 192–198.
10. Захаров В.М., Костко О.К., Герман А.И., Павлов В.И., Рокотян В.Е. Способ измерения геометрических характеристик неровной водной и других поверхностей: Авт. свид. № 415489 // Бюл. открытий, изобретений, промышленный образцов и товарных знаков. 1974. № 6.
11. Костко О.К., Чаянова Э.А., Орлов В.М. Использование лазеров на ИСЗ для получения метеорологической информации // Труды ЦАО. 1973. Вып. 105. С. 45–53.
12. Захаров В.М., Костко О.К., Бирич Л.Н., Крученицкий Г.М., Портасов В.С. Лазерное зондирование атмосферы из космоса. Л.: Гидрометеониздат, 1990. 320 с.
13. Khattatov V.U., Tyabotov A.E., Alekseev A.P., Postnov A.A., Stulov E.A. Aircraft lidar studies of the Arctic haze and their meteorological interpretation // Atmos. Res. 1997. V. 44. P. 99–111.
14. Stefanutti L., Sokolov L., Balestri S., Mackenzie A.R., Khattatov V. The M-55 Geophysica as a platform for the Airborne Polar Experiment // Amer. Meteorol. Soc. 1999. V. 16, N 10. P. 1303–1312.

*V.M. Zakharov, O.K. Kostko, V.U. Khattatov. Laser applications for atmospheric research in CAO.*

A brief review of the results of the Central Aerosological Observatory (CAO) for the use of laser for atmospheric research since the invention of the first lasers is presented. The main historical stages of development of different areas of atmospheric research in the CAO are considered, in which lasers have taken a worthy place. Among them meteorological laser sounding of the atmosphere, the study of optical and microphysical properties of clouds and atmospheric aerosols in the troposphere and stratosphere, gas analysis and chemistry of the upper and lower atmosphere, remote sensing of underlying surface.