«Оптика атмосферы и океана», **32**, № 9 (2019)
DOI: 10.15372/AOO20190905

УДК 551.510.42

Лазерное и оптическое зондирование атмосферы

Г.Г. Матвиенко, П.А. Бабушкин, С.М. Бобровников, А.Г. Боровой, Д.А. Бочковский, В.П. Галилейский, А.И. Гришин, С.И. Долгий, А.И. Елизаров, Д.В. Кокарев, А.В. Коношонкин, А.В. Крючков, Н.В. Кустова, А.В. Невзоров, В.Н. Маричев, А.М. Морозов, В.К. Ошлаков, О.А. Романовский, А.Я. Суханов, Д.А. Трифонов, С.В. Яковлев, С.А. Садовников, А.А. Невзоров, О.В. Харченко*

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 2.04.2019 г.

Дан анализ развития лидарных и прожекторных средств и методов исследования атмосферы, созданных в Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, за последние годы. Представлены основные результаты, полученные с помощью разработанных приборов и методик.

Ключевые слова: лидар, атмосфера, рассеяние, аэрозоль, газовые примеси; lidar, atmosphere, scattering, aerosol, gas impurities.

Введение

Дистанционные методы изучения атмосферы очень актуальны в настоящее время. Это обусловливает развитие лазерных и оптических технологий ее зондирования. Лазерные методы, реализуемые с помощью лидаров (лазерных локаторов), основываются на взаимодействии оптических импульсов с атмосферными образованиями. Они разрабатываются со времени получения лазерной генерации (1960 г.) и показали свою эффективность при исследовании профилей метеорологических величин (температура, влажность, ветер) и содержания аэрозольных частиц и газовых примесей в атмосфере до высот мезопаузы (80–100 км) [1]. Лазерные методы позволяют получать данные об атмосфере с высоким пространственным разрешением, соответствующим микромасштабным особенностям, и при временных реализациях от долей секунд до многолетних рядов.

Оптические (нелазерные) методы зондирования представлены, прежде всего, прожекторными методиками, вошедшими в практику в первой половине XX в. [2]. Достижениями прожекторного зондирования следует считать получение первых сведений о высотном распределении взвешенных частиц и создание модельных представлений о безоблачной тропосфере и нижней стратосфере.

Сегодня лазерно-оптическое зондирование – одно из ведущих направлений исследований в Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева (ИОА) СО РАН. Разработаны образцы лидаров различного назначения для космического, самолетного, корабельного, мобильного, стационарного и сетевого размещений [3–5]. Получили существенное развитие технологии решения обратных задач восстановления микрофизических и концентрационных характеристик атмосферных образований, обнаружения ранее недоступных примесей.

* Геннадий Григорьевич Матвиенко (mgg@iao.ru); Павел Александрович Бабушкин (bpa@iao.ru); Сергей Михайлович Бобровников (bsm@iao.ru); Анатолий Георгиевич Боровой (borovoi@iao.ru); Дмитрий Андреевич Бочковский (moto@iao.ru); Виктор Петрович Галилейский (gvp@iao.ru); Анатолий Иванович Гришин (aig@iao.ru); Сергей Иванович Долгий (dolgii@iao.ru); Алексей Игоревич Елизаров (alex@iao.ru); Дмитрий Валериевич Кокарев (kdv_02@iao.ru); Александр Владимирович Коношонкин (sasha_tvo@iao.ru); Александр Владимирович Крючков (kaw@iao.ru); Наталья Валентиновна Кустова (kustova@iao.ru); Алексей Викторович Невзоров (nevzosorov@iao.ru); Валерий Николаевич Маричев (marichev@iao.ru); Александр Михайлович Морозов (moroz@iao.ru); Виктор Константинович Ошлаков (ovk@iao.ru); Олег Анатольевич Романовский (roa@iao.ru); Александр Яковлевич Суханов (say@iao.ru); Дмитрий Александрович Трифонов (trifonov@iao.ru); Семен Владимирович Яковлев (ysv@iao.ru); Сергей Александрович Садовников (sadsa@iao.ru); Алексей Алексеевич Невзоров (naa@iao.ru); Ольга Викторовна Харченко (olya@iao.ru).

© Матвиенко Г.Г., Бабушкин П.А., Бобровников С.М. и др., 2019

В настоящей работе описываются новые лидарные реализации и лидарно-оптические методы, а так же результаты их применения.

1. Лидарные измерения температуры атмосферы на основе эффекта спонтанного комбинационного рассеяния

Идея измерения температуры атмосферы с помощью эффекта спонтанного комбинационного рассеяния (СКР) основана на использовании температурной зависимости отношения интенсивностей оптимальной комбинации температурно-чувствительных линий вращательного спектра комбинационного рассеяния на молекулах азота и кислорода. Для простоты изложения проиллюстрируем суть подхода на примере вращательного спектра комбинационного рассеяния на молекулах азота.

Для реализации методики выделяются четыре участка чисто вращательного спектра комбинационного рассеяния, чувствительные к температуре. Линии с отрицательной зависимостью интенсивности от температуры объединяются в одном спектральном канале, а с положительной зависимостью — в другом (рис. 1).

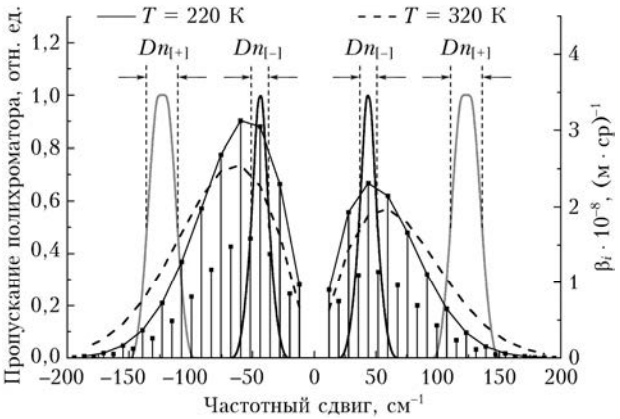


Рис. 1. Инструментальная функция полихроматора и огибающие чисто вращательного спектра комбинационного рассеяния на молекулах азота для температуры 220 и 320 К. Спектры кислорода для простоты опущены. Рисунок заимствован из [3]

Как следует из лидарного уравнения для эффекта СКР [6], отношение сигналов $R = \frac{N_{[-]}}{N_{[+]}}$ в двух спектральных каналах, объединяющих линии с противоположной зависимостью от температуры, накопленных в течение времени Δt, необходимого для достижения требуемых статистических характеристик сигналов, не содержит компонентов аппаратной функции лидара, которые зависят от расстояния, что делает удобным его применение для измерения температуры воздуха.

Температурная чувствительность (крутизна) отношения $R(T)$ определяется температурной зависимостью (рис. 2) и интенсивностью выделяемых спектральных линий. Время накопления сигнала зависит от общей интенсивности линий выбранного участка спектра.

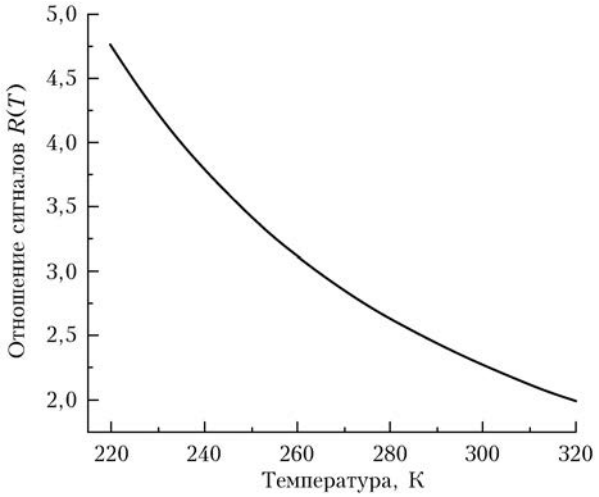


Рис. 2. Зависимость отношения сигналов от температуры воздуха. Рисунок заимствован из [3]

Спектроскопическая задача выделения чувствительных к температуре линий чисто вращательного спектра СКР на молекулах азота и кислорода может быть решена различными инструментальными методами. Но в целом существует только два типа диспергирующих элементов, способных обеспечить спектральное разрешение, необходимое для выполнения поставленных нами задач: дифракционные решетки и интерференционные фильтры.

Как было показано ранее [3], использование суммы стоксовой и антистоксовой ветвей чисто вращательных спектров СКР позволяет получить выигрыш в сигнале в 2,24 и 2,86 раз в каналах $n_{[-]}$ и $n_{[+]}$ по сравнению с использованием только антистоксовой ветви. Насколько нам известно, одновременное выделение стоксовой и антистоксовой ветвей с помощью полихроматора на основе фильтров пока никем не реализовано.

На рис. 3 (цв. вкладка) представлен разработанный в ИОА СО РАН альтернативный инструментальный подход, осуществленный на базе двойного полихроматора с дифракционными решетками и волоконно-оптической передачей оптических сигналов.

Двойной полихроматор позволяет решить задачу одновременного выделения четырех информативных участков спектров СКР по обе стороны от линии возбуждающего излучения, обеспечивая при этом необходимый уровень подавления линии несмещенного рассеяния (10^8–10^{10}), в зависимости от типа применяемых дифракционных решеток.

Оптический сигнал, собранный приемным телескопом лидара, проходит по моноволоконному световоду, диаметр которого соответствует диаметру полевой диафрагмы лидара, и поступает во входной световодный блок первого полихроматора (рис. 3). Пять оптических волокон, расположенных вдоль линии дисперсии первого полихроматора, предназначены для выделения линии упругого рассеяния

и четырех информативных участков чисто вращательного спектра СКР – двух в стоксовой ветви и двух в антистоксовой. Центральный световод в линии световодов совмещен с изображением торца входного световода на длине волны λ упругого рассеяния. Выделенный оптический сигнал упругого рассеяния поступает по оптическому волокну на фотодетектор.

Остальные четыре световода содержат сигналы информативных участков спектра СКР, которые, в принципе, также могли бы быть отправлены на фотоприемники. Однако уровень диффузного фона от мощной линии несмещенного рассеяния, определяемый контрастом дифракционной картины, который позволяет обеспечить дифракционная решетка, обычно составляет 4–6 порядков в зависимости от технологии изготовления решетки. Этой величины недостаточно, и для дополнительного подавления фона несмещенного рассеяния используется второй полихроматор.

На основе предложенного принципа нами была создана серия спектральных приборов, которая в течение нескольких лет проходила испытания на действующих лидарных системах Европейской лидарной сети EARLINET (European Research Lidar Network). Данные лидарных измерений вертикального распределения температуры атмосферы, полученные с использованием двойного монохроматора, сравнивались с данными радиозондирования. Результаты сравнения показали высокий уровень совпадения данных. Испытания продемонстрировали, что вне зависимости от используемой длины волны зондирующего излучения применение двойного монохроматора обеспечивает высокие метрологические качества системы измерения температуры даже в оптически плотных аэрозольных образованиях. Результаты некоторых испытаний приводятся на рис. 4 (цв. вкладка). Видно, что профили температуры, полученные синхронно лидаром и радиозондом, почти совпадают (отличия – в пределах ошибок измерений по всей трассе зондирования, включая ближнюю зону лидара).

В многочисленных экспериментах было показано, что применение двойного полихроматора в лидарном методе измерения температуры атмосферы позволяет обеспечить необходимую стабильность спектральных характеристик при выделении участков чисто вращательных спектров СКР и гарантировать постоянство метрологических характеристик СКР лидара для измерения температуры. Сравнения лидарных измерений с радиозондовыми доказывают, что СКР лидар может успешно выступать в качестве альтернативного средства контроля вертикального распределения температуры атмосферы.

2. Лидарный спектроскопический газоанализ атмосферы

2.1. Измерение озона в верхней тропосфере – стратосфере

Наиболее чувствительным среди методов, используемых для определения пространственного распределения концентрации какого-либо атмосферного газа, является метод дифференциального поглощения (МДП). В настоящее время лидарное зондирование малых газовых составляющих атмосферы, в том числе и озона, по МДП реализовано на практике [5, 7, 8]. В Томске на Сибирской лидарной станции [5] создана лидарная система для измерения вертикального распределения озона (ВРО) в верхней тропосфере – стратосфере в высотном диапазоне ~5–45 км на длинах волн $\lambda = 0{,}299/0{,}341$ и $0{,}308/0{,}353$ мкм. Она позволяет выявлять изменчивость ВРО в верхней тропосфере – стратосфере, где озон играет роль пассивного трассера циркуляционных процессов, и выше велопаузы (~26 км), где поведение озоносферы определяется фотохимическими процессами. Технические характеристики и принципы работы системы подробно описаны в работе [9].

Натурные эксперименты в Томске показали, что при работе на длинах волн 0,308/0,353 мкм максимальная высота потолка зондирования достигает ~40–45 км (озоновый максимум в Томске расположен в высотном интервале 19–21 км), нижняя граница составляет 15 км. Попеременное зондирование озона лидарным комплексом на парах длин волн 0,299/0,341 и 0,308/0,353 мкм позволяет охватить диапазон высот от ~5 до ~45 км.

Было проведено сопоставления профилей ВРО, восстановленных из измерений созданной лидарной системой и озоновых профилей IASI (MetOp), MLS (AURA) в верхней тропосфере – нижней стратосфере и в стратосфере. На рис. 5 приведен наиболее показательный пример сопоставления для серии лидарных и спутниковых измерений в 2017 и 2018 гг. Следует отметить, что лидарная система работает в режиме накопления импульсов фототока, пространственное разрешение при этом, как правило,

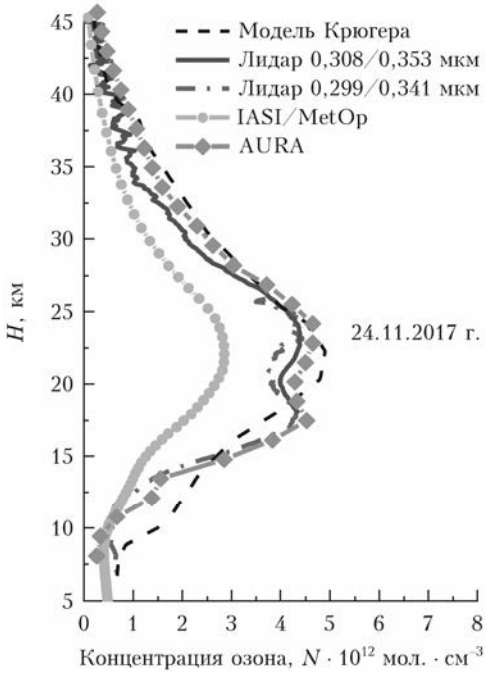


Рис. 5. Восстановленные профили озона в стратосфере и верхней тропосфере – стратосферы для 24 ноября 2017 г. и профили спутников AURA и MetOp

составляет 100 м. Профиль IASI более гладкий и не дает детального представления о ВРО, в отличие от лидарных измерений. Отклонения обусловлены разницей в пространственных разрешениях лидара (100 м), спутника AURA (1,3 км и больше) и спутника MetOp (150 м и больше) и, следовательно, бóльшим количеством точек, формирующих ВРО, у лидара, что также влияет на поведение кривой восстановленного ВРО. Хорошее согласие профилей ВРО подтверждает эффективность использования двух пар длин волн 0,299/0,341 и 0,308/0,353 мкм для зондирования озона.

2.2. Измерение газов на основе технологии параметрической генерации света

Для натурных измерений газового состава атмосферы в спектральных диапазонах 3–4 и 1,8–2,5 мкм нами создана универсальная лидарная система на основе технологии параметрической генерации света. Ее блок-схема приведена на рис. 6.

В качестве задающего генератора выступает Nd:YAG-лазер модели LQ529B, обеспечивающий генерацию лазерных импульсов длительностью 10–13 нс с энергией в импульсе 350 мДж при частоте повторения 10 Гц на $\lambda = 1{,}064$ мкм.

Преобразователь излучения включает: 1) задающий узкополосный параметрический генератор на кристаллах КТР с накачкой излучением 2-й гармоники с $\lambda = 0{,}532$ мкм; он предназначен для генерации маломощного излучения накачки с перестраиваемой длиной волны в областях 0,785–0,840 и 0,710–0,755 мкм (сигнальная волна λ_{signal}), а также 1,45–1,65 и 1,800–2,128 мкм (холостая волна λ_{idler}); 2) параметрический генератор на кристаллах КТА с накачкой излучением с $\lambda = 1{,}064$ мкм; 3) параметрический генератор на кристаллах КТА для генерации и усиления излучения с перестраиваемой длиной волны в области 3–4 мкм и шириной линии <2 см$^{-1}$; 4) мощный параметрический генератор на кристаллах КТР, предназначенный для генерации и усиления излучения с перестраиваемой длиной волны в области 1,8–2,5 мкм и шириной линии <2 см$^{-1}$. Конструкция преобразователя предусматривает возможность установки узкополосного инжекционного лазерного диода с оптическими изоляторами для генерации излучения с шириной линии менее 0,1 см$^{-1}$.

В ходе проведения экспериментов по определению энергетических характеристик лазерной системы максимальная энергия импульса в диапазоне длин волн 3–4 мкм достигала 9 мДж, в диапазоне длин волн 1,8–2,5 мкм – 23 мДж [3].

Перестройка длины волны обеспечивается поворотом кристаллов КТР и КТА с помощью трех автоматизированных шаговых двигателей. Для контроля λ выходного излучения используется спектрометр S100–2048; с его помощью определяется длина волны генерации λ_{signal} параметрического генератора 1. Перед направлением излучения вдоль трассы зондирования часть выходного излучения отводится пластиной, изготовленной из CaF_2, для регистрации опорного сигнала. Лазерный пучок расширяется зеркальным коллиматором и позволяет уменьшить угол расходимости излучения до 1 мрад.

Приемная часть лидара состоит из телескопа Кассегрена (фокусное расстояние – 118 мм), который фокусирует обратнорассеянное из атмосферы лазерное излучение на чувствительную площадку (300 мкм) термоохлаждаемого InAs/InAsSbP фотодиода. Сигналы оцифровываются с помощью 8-битного аналого-цифрового преобразователя, обеспечивающего частоту дискретизации по всем каналам 1 Гвыб./с и варьируемую полосу пропускания вплоть до 200 МГц.

С использованием лидарной системы экспериментально зарегистрированы эхосигналы в условиях реальной атмосферы (рис. 7) при дискретной перестройке длины волны в диапазонах 3–4 и 1,8–2,5 мкм.

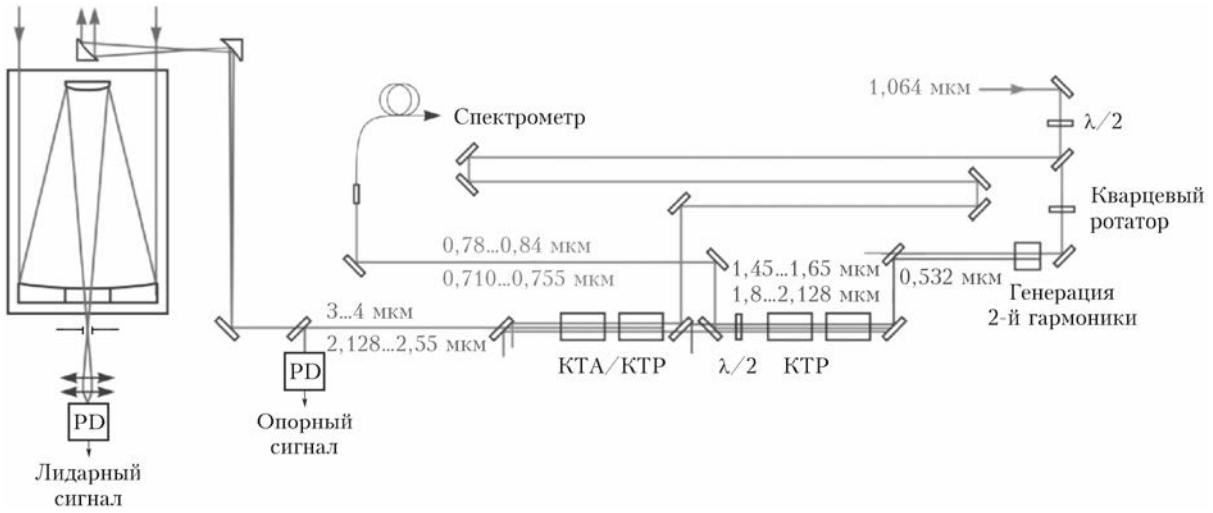
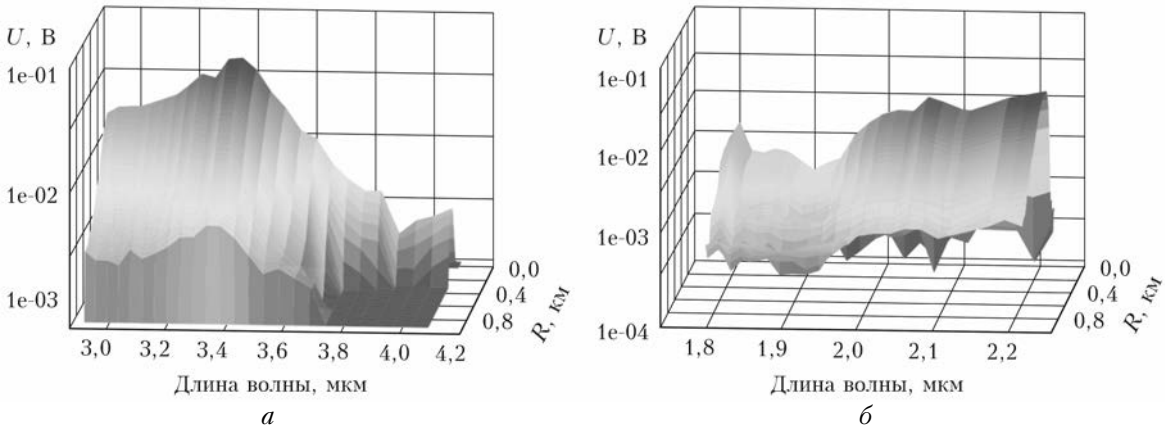


Рис. 6. Преобразование лазерного излучения в лидарной системе для натурных измерений газового состава атмосферы в спектральных диапазонах 3–4 и 1,8–2,5 мкм



а *б*

Рис. 7. Типичный набор эхосигналов на дискретных линиях излучения ПГС-лидарной системы в спектральных диапазонах: *а* – 3–4 мкм; *б* – 1,8–2,5 мкм

На рис. 7, *а* показано, что лидар, работающий в диапазоне спектра 3–4 мкм, позволяет регистрировать обратнорассеянное в атмосфере излучение на трассах 1 км в области спектра 3–3,7 мкм и на трассах до 0,5 км в области спектра 3,7–4 мкм. Уменьшение дальности зондирования на этом участке спектра объясняется резким спадом энергии в импульсе выходного излучения лидара. Дальность зондирования можно увеличить путем увеличения энергии в импульсе выходного излучения лидара за счет модернизации лазерной системы, в частности с помощью дополнительного каскада нелинейных кристаллов, обеспечивающих параметрическую генерацию света. Рис. 7, *б* демонстрирует, что лидар, работающий в диапазоне спектра 1,8–2,5 мкм, позволяет регистрировать обратнорассеянное в атмосфере излучение на трассах 1 км во всей области перестройки лазерного излучения.

Экспериментально зарегистрированные эхосигналы доказывают возможность дистанционного газоанализа атмосферы с использованием разработанной лидарной системы в диапазонах длин волн 1,8–2,5 и 3–4 мкм.

Расчеты и численное моделирование [5, 10–12] подтверждают, что созданная в ИОА СО РАН лидарная система может применяться для обнаружения и мониторинга малых газовых составляющих атмосферы в концентрациях от фоновых и выше в спектральных диапазонах 3–4 мкм (H_2CO, C_2H_2, HBr, HCl, NO_2, N_2O, HCN, C_2H_6, CH_4) и 1,8–2,5 мкм (H_2O, CO_2).

3. Моделирование космического лидара для определения содержания парниковых газов

За последние несколько десятков лет сильно возросла концентрация парниковых газов, в частности CO_2, N_2O и CH_4. В настоящее время относительное содержание, например, углекислого газа достигает уже 400–410 ppm, тогда как в 2000 г. оно составляло 360 ppm [13–16]. В конце 1970-х и начале 1980-х гг. скорость увеличения концентрации метана в атмосфере была максимальной – 1% в год. Однако с начала 1990-х гг. она значительно уменьшилась, и в 1999–2005 гг., в период действия Киотского протокола, рост концентрации CH_4 в атмосфере фактически прекратился. Несмотря на это наблюдается значительная межгодовая изменчивость концентрации метана, причины которой недостаточно ясны [17].

Усилия мирового сообщества направлены на глобальное изучение стоков и истоков газов, дающих вклад в парниковый эффект. Для этого создаются средства пассивного и активного наблюдения. Функционирующая сейчас лаборатория пассивного зондирования OCO-2 (Orbiting Carbon Observatory-2) позволяет измерять среднюю концентрацию углекислого газа с погрешностью порядка 0,3% [18]. Также планируются разработка активных лидарных методов, создание самолетных и космических лидаров [19–21]. Наиболее известные из них: проект космического лидара миссии Merlin (MEthane Remote sensing Lidar missioN) [22], инициированный DLR (German Space Administration) и CNES (French Space Agency), и проекты лидаров миссии A-Scope (Advanced Space Carbon and Climate Observation of Planet Earth) [23, 24], инициированные европейским космическим агентством ESA. Китайская народная республика также начала исследования в этом направлении [21].

Лидар Merlin предполагает возможность измерения средней концентрации метана со случайной погрешностью порядка 27 ppb и систематической 3 ppb со спутника с орбитой 500 км; энергия импульсов – 9,5 мДж, частота лазера – 20 Гц, размер телескопа – 69 см, длины волн on и off – 1,64556 и 1,64583 мкм соответственно, предполагаемое разрешение измерений – 50 км. Дата запуска лидара неоднократно переносилась. Сейчас он ориентировочно запланирован на 2021–2022 гг. [22].

По оценкам различных авторов, космические лидары позволят измерять CO_2 с ошибкой порядка 0,2–0,4% при разрешении 50–60 км, предполагаемые орбиты – от 400 до 800 км [19, 21–24]. В качестве источников излучения рассматриваются твердотельный эрбиевый лазер либо Nd:Yag-лазер с оптико-параметрическим осциллятором, предполагаемые длины волн on и off – ~1,51 мкм.

В наших работах [25–29] проведены оценки возможностей восстановления концентрации углекислого газа и метана при зондировании IPDA-лидаром с приемником прямого детектирования и гетеродинным приемником как с борта космической платформы, так и со стратосферных и тропосферных высот. В качестве методов решения обратных задач были рассмотрены нейронные сети и специализированные алгоритмы, включая генетический. Проведено прямое моделирование с учетом различных атмосферных ситуаций (в работах зарубежных авторов рассматривается в основном фиксированный газовый профиль).

При прямом детектировании с параметрами системы, указанными в табл. 1, и орбитой спутника 450 км возможно восстановление относительной средней концентрации углекислого газа с ошибкой 0,16%, что составляет порядка 0,6–0,7 ppm. Прямое детектирование предполагает использование импульсов с энергией 50 мДж, приемника диаметром 1 м, частоты излучателя 50 Гц и накопления 400 импульсов при разрешении 60 км. Зондирование с высот 23 и 10 км при таких же параметрах системы дает ошибку 0,31 и 0,125 ppm соответственно. Использование нейронной сети или генетического алгоритма позволяет восстановить профиль относительной концентрации CO_2. Наши расчеты показывают, что максимальная ошибка восстановления ожидается у поверхности земли – порядка 2 ppm на высотах от 0 до 500 м, а затем она уменьшается до 0,6 ppm на высотах до 2 км. Большее значение ошибки на малых высотах обусловлено широким диапазоном изменчивости концентрации CO_2 у поверхности.

Таблица 1

Технические параметры лидарной системы

Параметр	Значение
Длины волн (on, off), мкм	1,572025; 1,572185
Время между импульсами, мс	0,1–0,2
Длительность импульса, нс	30
Расходимость лазерного пучка, мрад	0,1
Квантовая эффективность приемника	0,8
Температура T, К	290
Сопротивления с обратной связью R_F, MΩ	1
Полоса пропускания, МГц	3
Плотность темнового тока i_D, фА/Гц^{0,5}	160
Высота, км	450
Скорость спутника, км/с	7,64
Ширина пропускания фильтра, нм	1
Коэффициент отражения, стр$^{-1}$	0,08
Эффективная высота отражения, м	<50

Использование гетеродинного приема при тех же параметрах системы дает возможность снизить требования к техническим характеристикам лидарной системы (мощности излучателя и размеру приемника). К сожалению, отношение сигнал-шум при некогерентном приеме во многом зависит от возможности обработки отдельных спеклов и количества импульсов накопления, так как одна из аддитивных составляющих шума пропорциональна уровню сигнала с учетом обработки квадрата суммы комплексных составляющих Фурье-преобразования, распределенного по экспоненциальному закону. В наших расчетах необходимо использовать энергию импульсов 0,2 мДж, предельную частоту 7500 Гц, размер телескопа 0,5 м, что дает среднюю ошибку порядка 1,44 ppm (0,35%) при разрешении 60 км. Увеличение энергии до 0,4 мДж незначительно снижает ошибку, до 1,37 ppm.

Выполненное нами прямое численное моделирование, а так же решение обратной задачи с использованием нейронных сетей и псевдообратных матриц для зондирования метана показывают примерно те же погрешности измерений, что приводятся в работах зарубежных авторов, посвященных лидару Merlin. Мы рассматривали возможности зондирования на длинах волн лидара Merlin, а также на длинах волн в районе 1,61 мкм. Для зондирования CH_4 нами были выбраны длины волн 1,65095 и 1,65086 мкм. Эти линии волн находятся в линии и в крыле линии поглощения метана, где влияние поглощения водяного пара и углекислого газа не столь значительно. Ошибки определения концентрации, полученные при моделировании систем с различными параметрами, приведены в табл. 2.

Таким образом, на длинах волн зондирования 1,65086 и 1,65095 мкм возможно достижение уровня ошибки 25 ppb при энергии излучателя 9 мДж, частоте 20 Гц, диаметре телескопа 0,68 м и разрешении 54 км.

4. Лидарные наблюдения полярных стратосферных и мезосферных облаков над Томском

На лидарном комплексе малой станции высотного зондирования атмосферы с 1986 г. проводится мониторинг средней атмосферы. Одной из главных задач этого мониторинга является отслеживание пространственно-временной динамики аэрозоля как важной климатообразующей компоненты атмосферы. Хорошо известно, что основное аэрозольное наполнение средней атмосферы в периоды активной вулканической деятельности определяется продуктами вулканических выбросов (эруптивный аэрозоль), а в спокойные периоды – заносами аэрозоля из тропосферы в стратосферу (фоновый аэрозоль). Значительно меньший вклад в аэрозольную компоненту средней атмосферы вносят так называемые полярные стратосферные и мезосферные облака. Интерес к названным облакам вызван тем, что они слабо изучены, в том числе в Западной Сибири, поскольку крайне редко появляются в средней атмосфере этого региона. В настоящем разделе описываются уникальные случаи лидарных наблюдений указанных облаков.

Полярные стратосферные облака (ПСО) образуются при крайне низких температурах (ниже 195 К) и могут состоять из частиц тригидрата азотной кислоты, тройного соединения (молекулы азотной и серной кислоты и воды) и льда. По результатам

Таблица 2

Параметры моделирования лидарной системы

Параметр	Система 1	Система 2	Система 3 (Merlin)	Система 4
Длина волны, on, мкм	1,65095	1,64555	1,64555	1,65095
Длина волны, off, мкм	1,65086	1,64583	1,64583	1,65086
Энергия в импульсе, мДж	25	25	9	9
Диаметр телескопа приемной системы, м	1	1	0,68	0,68
Разрешение лидара, км	15	15	54	54
Частота импульсов, Гц	50	50	20	20
Количество импульсов накопления	100	100	144	144
Ошибка определения средней относительной концентрации, ppb	8	10	27	25

лидарных измерений стратификации аэрозоля, выраженной через отношение рассеяния R на длине волны 0,532 мкм, в январе 2010 г. были обнаружено появление рассеивающих слоев в области высот 15–20 км (рис. 8, цв. вкладка). При этом синхронные измерения, проводимые со спутника AURA, показали, что температура в этом диапазоне высот примерно на 5–7 °C превышала порог образования ПСО.

Для выяснения природы образования рассеивающих слоев нами был выполнен траекторный анализ переноса воздушных масс для интервала высот 15–25 км. Как показал расчет обратных траекторий переноса, они проходили в направлении с запада на восток вокруг Северного полюса над регионами северной Скандинавии и южнее Новой Земли. Минимальная температура 190 К была зарегистрирована около Новой Земли за день до появления рассеивающего слоя, 18 января. Таким образом, было установлено, что ПСО образовались в арктическом регионе и были принесены к Томску.

Следующий редкий случай наблюдений ПСО над Томском относится к январю 2016 г. В начале третьей декады месяца структура аэрозоля имела типичное фоновое распределение. С 26 по 30 января наблюдались аэрозольные слои с выраженными максимумами на высотах от 15 до 25–30 км (рис. 9, цв. вкладка). По ходу наблюдений синхронно проводились лидарные вертикальные измерения температуры, профили которых приведены на рис. 9, *б*. На рисунке четко видно отрицательное отклонение температуры, одновременно измеренной лидаром, радиозондом и спутником AURA, от среднемесячного значения ниже порога образования частиц ПСО. Начало образования аэрозоля ПСО заметно на графике 25 января 2016 г. на высоте 20 км с развитием в последующие дни. В этих наблюдениях впервые было обнаружено, что ПСО появляются не только в результате заноса со стороны Скандинавии, как это обычно происходит (Скандинавию принято считать регионом образования ПСО). Они могут образовываться и непосредственно над Западной Сибирью.

Пример лидарных наблюдений серебристых (мезосферных) облаков показан на рис. 10 (цв. вкладка). Был зарегистрирован уникальный случай зависания облаков над Томском в течении всего лета 2008 г. Облака имели устойчивую двухслойную структуру с высотами локализации центра слоев около 78 и 88 км. Ширина слоев составляла примерно 3 км. Второй и последний раз серебристые облака наблюдались в течение ночи 4 июля 2011 г. (рис. 11, цв. вкладка) на высоте 80 км с шириной слоя около 1 км. В последующие дни наблюдений в июле облака не регистрировались.

5. Лидарные наблюдения аэрозольных образований в пограничном слое атмосферы и их взаимодействия с облачными слоями

Физика взаимодействия и трансформации аэрозоля в пограничном слое атмосферы (ПСА) вызывает в настоящее время большой научный интерес. В распоряжении ученых имеется обширный класс разнообразных методов исследования и приборов, что позволяет анализировать широкий спектр данных. Появившиеся в последние годы лидарные методы дают возможность не только получать локальные данные о характеристиках аэрозоля, но и оценивать пространственно-временную изменчивость параметров аэрозольной компоненты в широких диапазонах. В этом разделе приводятся результаты лидарных наблюдений аэрозольной компоненты атмосферы, в том числе облаков, в ПСА, проведенных вблизи г. Томска осенью 2018 г. в различных погодных условиях.

В экспериментах использовался лидар, обладающий следующими основными параметрами: рабочая длина волны – 532 нм, энергия в импульсе – 50–70 мДж, длительность импульса – 15 нс, частота повторения – 30 Гц, фотоприемник ФЭУ-84, диаметр приемной апертуры – 0,15 м. Получаемые данные накапливались и усреднялись по 100 импульсам. Для восстановления профиля коэффициента рассеяния атмосферы использовался алгоритм Клетта–Ферналда [30, 31] для двухфазной системы рассеивателей. Потенциал лидара позволял получать данные на расстояниях до 3 км.

Атмосферные условия во время исследований можно разделить на три типа:

– слабоградиентное барическое поле;
– антициклональная погода;
– циклональные условия.

На рис. 12 (цв. вкладка) представлен временной ход профиля коэффициента рассеяния для ночных условий слабоградиентного барического поля. Видно, что коэффициент рассеяния слабо изменяется с высотой, за исключением облачного слоя на высотах 1,5–1,8 км.

Слой облаков может образоваться в результате конденсации водяного пара при увеличении абсолютной влажности воздуха или понижении его температуры. Чаще всего в свободной атмосфере действуют оба фактора. Изменение физических характеристик воздуха может происходить либо в результате конвекции более теплых участков воздушных масс и их адиабатического расширения и охлаждения, либо в результате адвекции воздуха, приводящей водяной пар в более холодные области атмосферы, например, в холодный фронт. Наиболее вероятный механизм образования облака на рис. 12 – адвективный, о чем свидетельствует отсутствием на рисунке всплывающих участков нагретого воздуха (термиков), а также тот факт, что во время зондирования стояла довольно холодная устойчивая погода с дневной температурой около 5–7 °C.

Рис. 12 и 13 (цв. вкладка) заметно отличаются. Рис. 13, на котором показан временной ход профилей объемного коэффициента рассеяния для антициклональных погодных условий, можно условно разделить на три части. К первой относится интервал времени от 20:00 до 23:00, когда происходит зарождение и развитие облачного слоя на высоте около 1,5 км. В отличие от рис. 12, облако формируется с помощью конвективного механизма. На интервале до 21:00 отчетливо видны формирующиеся вблизи земной поверхности и постепенно поднимающиеся тепловые ячейки, представляющие собой замкнутые области с повышенной концентрацией рассеивающих частиц. Далее, до 23:00, происходит подъем этих областей до уровня 1,3–1,5 км, адиабатическое охлаждение воздушных масс и их конденсация, то есть образование облачного слоя.

Ко второй части следует отнести временной интервал от 23:00 до 03:00 – фаза развития облака: высота облаков и концентрация частиц в облачном слое постоянна. В подоблачном слое атмосферы, на высотах до 1 км, происходят процессы перестроения аэрозольных слоев по высоте. Наблюдается также постепенное наполнение подоблачного слоя аэрозолем, в том числе за счет облачных частиц.

К третьей части рис. 13 относится временной промежуток после 03:00. Уже с 2:00 заметно уменьшение плотности облачного слоя, а затем следует стадия разрушения облака. Буквально за час облачный слой исчезает, а содержащийся в нем аэрозоль постепенно оседает в приземный слой атмосферы.

Рис. 14 (цв. вкладка) демонстрирует временной ход высотных профилей коэффициента рассеяния при циклональной погоде. Видно, что облачный слой в условиях циклона образуется в непосредственной близости от земной поверхности, на высоте около 500 м. Аэрозоль временами «забрасывается» на высоты 1–1,5 км, однако облачный слой на этих высотах не образуется. Как правило, циклонические облака сопровождаются ветром и осадками.

Следует отметить, что цветовое представление происходящих в атмосфере процессов наглядно демонстрирует возможности лидарного метода.

6. Расчет оптических характеристик перистых облаков, состоящих из агрегатов ледяных кристаллов

Перистые облака покрывают около 30% поверхности Земли, поэтому они существенным образом влияют на ее радиационный бюджет и, следовательно, на климат. (Здесь под перистыми облаками мы понимаем любые облака, состоящие из ледяных кристаллов). Недостаток знаний о радиационных характеристиках перистых облаков является одним из основных источников неопределенности в современных численных моделях радиационного баланса Земли. Использование корректных радиационных характеристик перистых облаков могло бы существенно улучшить существующие численные модели долгосрочного прогноза погоды и глобального изменения климата. Кроме того, знание концентрации ледяных кристаллов, а также таких их микрофизических характеристик, как размер и форма, необходимо для понимания процессов, протекающих в атмосфере Земли, которые приводят к возникновению, эволюции и распаду перистых облаков. Среди различных методов, используемых для изучения радиационных и микрофизических характеристик перистых облаков, важную роль играют лидарные методы [4].

Для перистых облаков с небольшой оптической толщей, когда применимо приближение однократного рассеяния света, такие оптические характеристики, как коэффициенты рассеяния и экстинкции, определяются как произведение концентрации кристаллов на матрицу рассеяния света на одном кристалле, где матрица усредняется по размерам, форме и пространственной ориентации кристаллов, встречающихся в облаке. Если облака зондируются лидарами, то матрица рассеяния – это матрица обратного рассеяния, которая принимает наиболее простой вид в случае хаотической ориентации кристаллов [4]:

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} M_{11} & 0 & 0 & M_{14} \\ 0 & M_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -M_{22} & 0 \\ M_{14} & 0 & 0 & M_{11} - 2M_{22} \end{pmatrix}.$$

Как показывают экспериментальные данные [32], элемент M_{14} обычно пренебрежимо мал, и матрица обратного рассеяния определяется двумя элементами: M_{11} – сечение обратного рассеяния одного хаотически ориентированного кристалла, усредненное по ансамблю кристаллов, и M_{22} – элемент, определяющий поляризацию рассеянного света.

Однако проведенные нами в 2013–2019 гг. вычисления матриц обратного рассеяния для простейших модельных форм кристаллов в виде гексагональных пластинок, столбиков, bullet-rosettes, droxtals и др. [33–38] показали, что обычно измеряемые при

лидарных исследованиях величины, такие как лидарное, спектральное и деполяризационное отношение, плохо согласуются с теоретическими результатами. Это дает основание считать, что в реальных перистых облаках подавляющее большинство — более сложные формы кристаллов типа фракталов, агрегатов из гексагональных столбиков или пластинок и др.

В этом разделе мы приводим результаты расчетов матриц обратного рассеяния для ледяного агрегата, состоящего из восьми гексагональных столбиков (рис. 15). Этот агрегат использовался в работах американских авторов [39]; они рассчитывали матрицы рассеяния под произвольными углами своим алгоритмом IGOM, который, как оказалось, неприменим к направлению рассеяния назад. Мы провели расчеты нашим алгоритмом метода физической оптики [33, 35], который одинаково применим ко всем направлениям рассеяния.

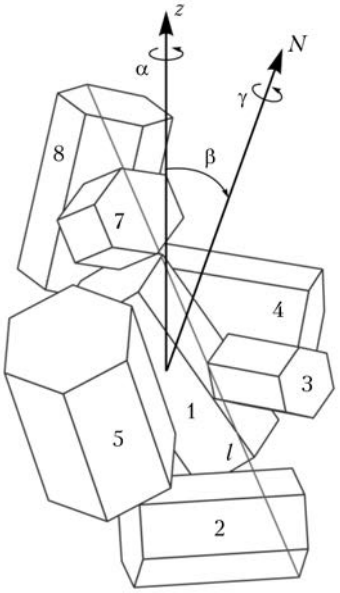


Рис. 15. Агрегат, состоящий из восьми гексагональных столбиков (столбик 6 не виден на рисунке при данной ориентации агрегата). Все геометрические параметры столбиков приведены в табл. 4; α, β, γ – углы Эйлера, определяющие ориентацию частицы в пространстве

Элементы матрицы обратного рассеяния M_{11} и M_{22} зависят от длины волны зондирующего излучения и от размеров кристаллов. В работе [37] мы показали, что зависимость от размера частицы для простейших форм кристаллов (гексагональные столбики и пластинки, дроксталлы и др.) можно с хорошей точностью экстраполировать степенными законами. Однако вопрос о зависимости матриц обратного рассеяния от размеров для ледяных кристаллов произвольных форм оставался открытым.

Мы провели расчеты для различных размеров хаотически ориентированного агрегата, представленного на рис. 15, нашим методом физической оптики. Результаты расчетов для четырех размеров агрегатов и для двух типичных для лидаров длин волн 0,355 и 1,064 мкм показаны на рис. 16. Отметим, что размер агрегата l (см. рис. 15) определялся как максимально расстояние между двумя точками на поверхности агрегата. Для агрегата с параметрами из табл. 3 он оказался равным 398 мкм. Затем произвольные размеры агрегата определялись простым масштабированием величины l = 398 мкм.

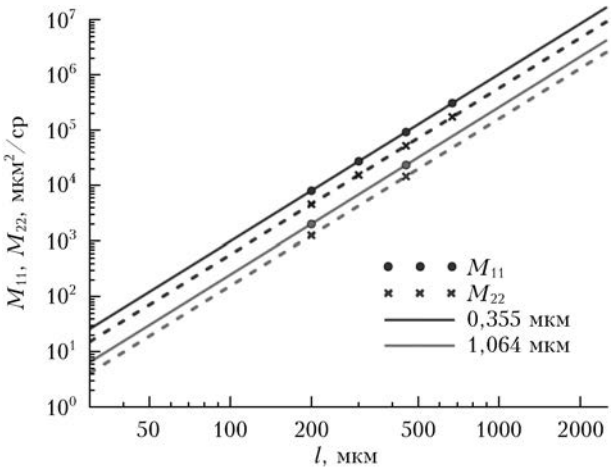


Рис. 16. Элементы матрицы обратного рассеяния для двух длин волн как функции размера ледяных агрегатов

На рис. 16 видно, что результаты расчетов в логарифмическом масштабе хорошо экстраполируются прямыми линиями, что соответствует вышеупомянутым степенным законам. Таким образом, мы получили важный результат — зависимость матриц обратного рассеяния от размеров кристаллов описывается степенными законами как для ледяных кристаллов простых форм, типа гексагональных столбиков и пластинок, так и для агрегатов более сложных форм.

В реальном перистом облаке размеры кристаллов l существенно варьируются, а распределение по размерам обычно подчиняется гамма-распределению:

$$p(l) = l\exp\left(\frac{-l}{l_{\text{modal}}}\right) \Big/ \int_{l_{\min}}^{l_{\max}} l\exp\left(\frac{-l}{l_{\text{modal}}}\right) dl. \qquad (1)$$

Здесь $l_{\min}$ и $l_{\max}$ — минимальный и максимальный размер агрегатов, встречающихся в облаке. Характеристикой размеров кристаллов в этом облаке является модальный размер l_{modal}, соответствующий максимуму функции (2).

При изменении состояния атмосферы как модальный размер, так и любые оптические характеристики облака будут меняться. Поэтому важно оценить, насколько такие измеряемые в лидарных исследованиях величины, как лидарное, спектральное и деполяризационное отношения, будут меняться при изменении состояния атмосферы, т.е. модального размера. Ответы на эти вопросы дают приведенные ниже результаты расчетов, полученные с использованием степенного закона для матрицы обратного рассеяния (см. рис. 16).

На рис. 17 показана зависимость сечения обратного рассеяния для перистых облаков, состоящих из ледяных агрегатов, от модального размера кристаллов.

Таблица 3

Геометрические параметры гексагональных столбиков, образующих агрегат на рис. 15

№	Диаметр D, мкм	Длина l, мкм	γ	β	α	x	y	z
1	92	158	23	50	–54	0	0	0
2	80	124	16	81	156	15,808	107,189	–60,108
3	56	78	5	57	94	–26,691	73,005	49
4	96	126	13	76	130	–88	–39,19	–11,643
5	106	144	11	29	–21	106,532	33,08	27,801
6	38	54	8	62	–164	35,923	–51,5	–37,533
7	68	102	29	41	60	40,11	–57,227	112,5
8	86	138	19	23	–122	–9,7524	–132,57	57,131

Примечание. x, y, z – декартовы координаты центров столбиков.

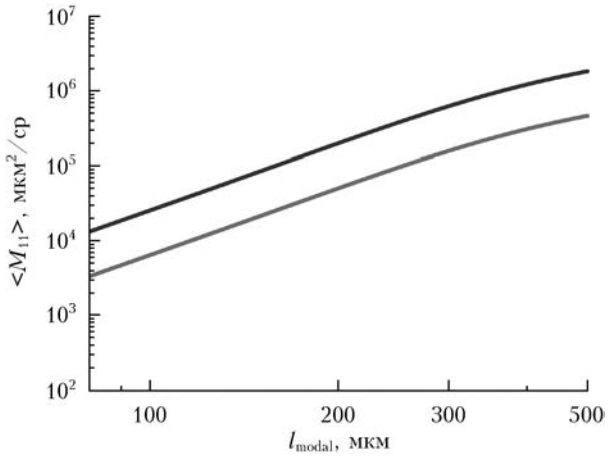


Рис. 17. Сечение обратного рассеяния одного кристалла как функция модального размера кристаллов в облаке для λ = 0,355 мкм (нижняя линия) и 1,064 мкм (верхняя)

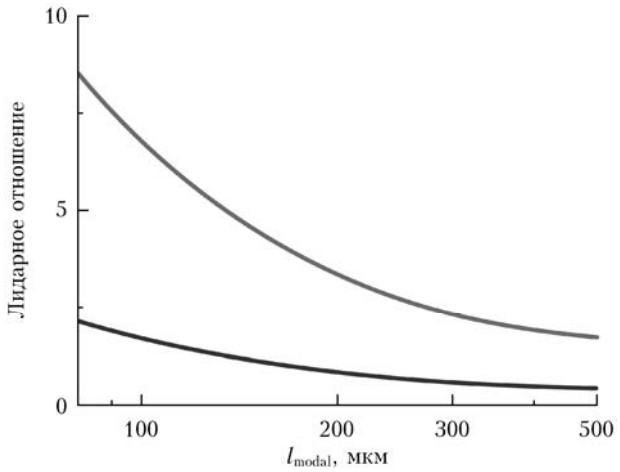


Рис. 18. Лидарное отношение как функция модального размера кристаллов в облаке для λ = 0,355 мкм (нижняя линия) и 1,064 мкм (верхняя)

Можно видеть, что зависимость сечения обратного рассеяния от модального размера частиц в облаке становится уже более сложной, чем аналитическая степенная зависимость. Это показывает необходимость представления результатов для практического использования в виде графиков или громоздких таблиц.

Практический интерес обычно представляет не сечение обратного рассеяния, а лидарное отношение, которое определяется как отношение $M_{11}/2S$, где S – площадь геометрической проекции кристалла на плоскость, усредненное согласно закону (1). Рассчитанное таким образом лидарное отношение как функция модального размера показано на рис. 18.

На практике лидарное отношение является достаточно стабильной величиной, которое принимает значения между 20 и 30. На рис. 18 теоретическое значение лидарного отношения явно занижено. Это доказывает, что в рассмотренной нами модели агрегатов вклад так называемого уголкового отражения, которое образуется за счет двугранного угла в 90° между гранями, завышен. Следовательно, реальная форма ледяных агрегатов должна быть более сложной, чем совокупность гексагональных столбиков. В пользу этого вывода говорят также рассчитанные нами значения линейного деполяризационного отношения $\delta = (M_{11} - M_{22})/(M_{11} + M_{22})$, которые лежат в интервале 0,2–0,3, тогда как экспериментальные данные попадают в интервал 0,3–0,5.

В заключение подчеркнем, что разработанный нами метод физической оптики является мощным численным медом, позволяющим рассчитывать рассеяние света на ледяных кристаллах перистых облаков, тогда как стандартные методы расчета, основанные на решении уравнений Максвелла, требуют неоправданно больших вычислительных мощностей. В последние 10 лет нам удалось численно рассчитать все основные характеристики рассеяния света для простейших форм ледяных кристаллов. Переход к более сложным формам частиц требует увеличения времени расчетов и оптимизации вычислительных алгоритмов. Здесь мы продемонстрировали успешное преодоление вышеуказанных трудностей на примере агрегата из восьми гексагональных столбиков.

7. Зондирование фемтосекундными лазерными импульсами

В настоящее время получили развитие методы и техника зондирования атмосферы мощными фемтосекундными (ФС) импульсами [40–42]. Для зондирования атмосферы используется излучение суперконтинуума (СК) – лидара «белого света». СК –

результат филаментации мощного ФС импульса, перераспределение энергии импульса в широком спектральном диапазоне. Применение фемтосекундных лидаров обусловило необходимость в модификации уравнения зондирования [43, 44] и, как следствие, потребность в информации о характеристиках внутриатмосферного источника зондирующего излучения: положении на трассе зондирования, сечении, спектральном составе СК, мощности, угловой расходимости. Подобную информацию можно получить из экспериментальных данных. В результате сформировалось новое направление в фемтосекундной атмосферной оптике, связанное с развитием методов удаленного позиционирования нелинейного фокуса, управлением положением зоны филаментации и ее протяженности, определением пространственно-временных, спектральных и энергетических характеристик СК в зоне филаментации, рассматриваемой как источник внутриатмосферного широкоспектрального СК-излучения («белый лазер»).

В ИОА СО РАН на контролируемой трассе были проведены эксперименты по управлению положением начала и длиной зоны филаментации [45–47]. Продемонстрирована высокая эффективность управления этими параметрами путем варьирования начального сечения и фокусировки лазерного пучка, что позволило перемещать область филаментации по всей длине оптической трассы (150 м).

Экспериментально установлено, что при множественной филаментации после завершения самофокусировки КИ лазерный пучок сжимается в глобальный фокус. Внутри центральной зоны диаметром в 3–5 раз меньше начального значения случайным образом формируется «пакет» постфиламентационных каналов (ПФК), окруженных ореолами – коническим распределением интенсивности. На удалении порядка 10 м от глобального фокуса начинает формироваться общая кольцевая структура, окружающая пакет ПФК. Она формируется при любом количестве и любой конфигурации филаментов в поперечном сечении пучка. На рис. 19 представлены значения поперечного сечения элементов филаментированного импульса.

Зарегистрированный спектр излучения в ПФК соответствует описаниям спектра излучения СК (рис. 20). Но есть особенность: в начале зоны филаментации, в видимой области спектра (антистоксовой по отношению к лазерной длине волны) формируется излучение конической эмиссии СК с четко выраженной зависимостью от длины волны угла расходимости (значения – порядка нескольких микрорадиан). В удаленных от зоны филаментации точках излучение СК сосредоточено в ПФК с расходимостью порядка десятка микрорадиан.

Таким образом, экспериментально установлено и теоретически обосновано, что в результате самофокусировки сверхкоротких импульсов, мощность которых P_0 превышает критическую P_{cr} для такой среды (для воздуха и $\lambda = 0{,}8$ мкм: $P_{cr} \approx 3 \div 4$ ГВт), на определенном расстоянии от источника в протяженной зоне (длиной в десятки метров) в сечении импульса происходит множественная филаментация

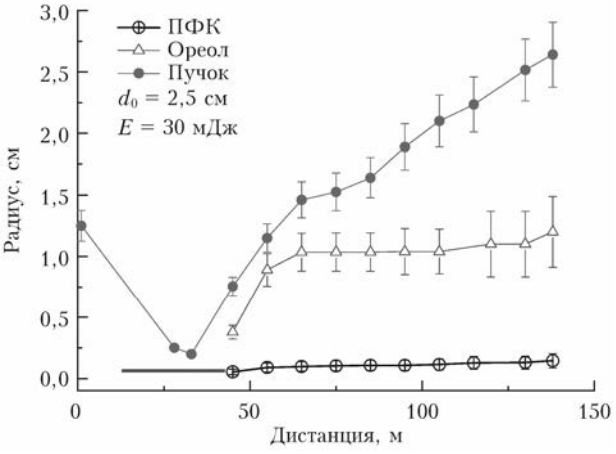


Рис. 19. Радиусы сечений элементов филаментированного импульса. Начальное значение диаметра пучка 2,5 см. Прямая линия – положение области филаментации; круглые символы – значения радиуса лазерного пучка до и после зоны филаментации; черно-белые символы – значения радиуса постфиламентационного канала; треугольники – радиусы ореола, окружающего ПФК. Энергия лазерного импульса 30 мДж

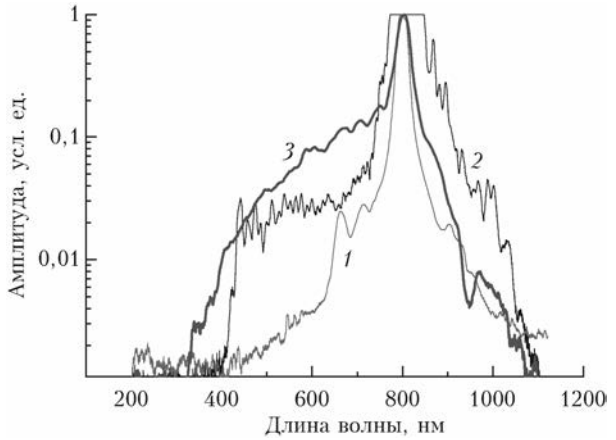


Рис. 20. Спектры излучения, зарегистрированные в начале зоны филаментации (коническая эмиссия СК, энергия импульса 20 мДж, длительность 50 фс, начальное сечение 2,5 см) (*1*), в постфиламентационном канале в точке трассы 100 м (начальные значения импульса: энергия 30 мДж, длительность 50 фс, сечение 2,5 см) (*2*) и лидарный сигнал от облака искусственного аэрозоля (*3*) [47]

и формируются ПФК. В начале зоны филаментации наблюдается перераспределение энергии импульса по широкому спектральному диапазону (в несколько спектральных октав относительно лазерной длины волны) в виде генерации конической эмиссии суперконтинуума (КЭ СК). По разным оценкам, в видимой области спектра КЭ СК сосредоточено 3–5% исходной энергии импульса. В ПФК также сконцентрировано излучение СК, но при этом сочетаются сравнимая с P_{cr} высокая мощность (порядка гигаватт) и минимальная расходимость излучения. После прохождения глобального фокуса расходимость отдельных ПФК – 10–20 мкрад, «пакета» ПФК – 90–100 мкрад, пучка в целом – 200 мкрад. Расходимость излучения в виде конической эмиссии СК из

области филаментации — системы цветных колец — несколько миллирадиан.

Если допустить, что в этом случае с учетом минимальной расходимости ПФК в сечении импульса реализуются условия для распространения излучения в режиме самоканалирования, то мощность излучения в канале должна быть не менее критической (несколько гигаватт). Именно такой уровень мощности зафиксирован в эксперименте: интенсивность в ПФК достаточна для формирования множественной филаментации в оптических элементах на дистанциях, значительно превосходящих протяженность области филаментации.

После завершения самофокусировки на длине волны излучения лазера в зоне глобального фокуса в сечении «сжатого» в 3–5 раз импульса реализуется мощность $\leq P_{\text{cr}}$.

В результате экспериментального и теоретического исследования филаментации фемтосекундных лазерных импульсов разработаны и опробованы методики удаленного управления положением зоны филаментации в атмосфере. Получены результаты, формализующие для известных начальных значений импульса параметры в уравнении лидарного зондирования: расположение внутриатмосферного источника широкоспектрального излучения относительно передатчика, объекта исследования и приемника; мощность, поперечное сечение и угловую расходимость излучения отдельных элементов филаментированного импульса.

Применение полученных результатов позволит осуществлять удаленное позиционирование мощного фемтосекундного импульса, формировать на заданном участке трассы зондирования высокоинтенсивный внутриатмосферный короткоимпульсный широкоспектральный источник излучения с минимальной расходимостью. Пространственно-временные и энергетические характеристики этого источника обеспечат высокие значения дальности зондирования атмосферы фемтосекундными лидарными системами.

8. Оптическое (прожекторное) зондирование атмосферы

Оптические методы зондирования атмосферы основаны на результатах взаимодействия оптического излучения с атмосферными частицами. Большой диапазон размеров атмосферных частиц приводит к необходимости использования для решения задачи оценки их распределения по размерам широкоспектрального оптического излучения. Для этого в ИОА СО РАН было создана установка прожекторного зондирования оптического состояния атмосферы «СВЕТЛЯЧОК», работающая в двух режимах генерации излучения (непрерывном и импульсном). Ее технические характеристики приведены в табл. 4. Основа установки — короткодуговая ксеноновая лампа сверхвысокого давления ДКсЭл-4000 (рис. 21, цв. вкладка).

Испытания созданной специализированной прожекторной установки показали ее высокую эффективность в части преобразования электрической энергии в световую [49–51]. Из литературных источников следует, что прожекторное зондирование на современной элементной базе возможно на высотах до 70 км [2].

Таблица 4

Технические характеристики установки «СВЕТЛЯЧОК»

Характеристика	Значение
Диаметр зеркала, формирующего излучение, мм	470
Мощность оптического излучения в непрерывном режиме излучения, кВт	1,2
Частота следования импульсов оптического излучения, Гц	2÷25
Мощность оптического излучения в импульсном режиме излучения, кВт	4÷18
Угловая расходимость излучения, град	0,5÷5

На рис. 22 (цв. вкладка) представлен результат взаимодействия широкоспектрального узконаправленного оптического излучения с атмосферными частицами в разных атмосферных условиях.

Анализ результатов наблюдений, выполненных в реальных атмосферных условиях с помощью созданной прожекторной установки, свидетельствует об эффективности исследования физических свойств атмосферы с использованием широкоспектрального оптического излучения, сформированного в узком угловом диапазоне.

Заключение

Проведенный анализ развития лидарных технологий в ИОА СО РАН показал их широкие возможности, в частности, впервые осуществлено лидарное измерение профиля температуры в тропосфере на основе одновременного детектирования стоксовой и антистоксовой ветвей чисто вращательных спектров спонтанного комбинационного рассеяния на молекулах азота или кислорода. Такой подход перспективен для замены аэрологического зондирования этого параметра.

Развитие метода дифференциального поглощения позволило создать две уникальные лидарные системы для изучения газового состава атмосферы. Одна из них предназначена для определения концентрации озона в тропосфере и стратосфере в области высот 5–50 км. Ее физической основой является использование лазеров с набором пар длин волн для зондирования 0,299/0,341 (тропосфера) и 0,308/0,353 мкм (стратосфера). Появление такого лидара обеспечило количественные исследования тропостратосферного обмена, имеющего много неопределенностей. Вторая лидарная система ориентирована на изучение широкого круга газовых примесей в нижней атмосфере, имеющих полосы поглощения в интервалах длин волн 1,8–2,5 и 3–4 мкм. Продемонстрирована возможность определения следующих малых газовых составляющих в концентрациях от фоновых и выше: H_2CO_2, C_2H_2, HBr, HCl, NO_2, N_2O, HCN, C_2H_6, CH_4, CO_2, H_2O. Дальнейшим развитием метода дифференциального поглощения является определение требований к лидарной

системе, размещаемой на борту космической платформы, для глобального определения общего содержания парниковых газов в воздухе на нашей планете. Выбраны спектральные диапазоны и заданы параметры узлов космического лидара для зондирования углекислого газа и метана.

С помощью лидаров, работающих в мониторинговый режим на Сибирской лидарной станции, проводились исследования достаточно редких для Томска полярных стратосферных и серебристых (мезосферных) облаков, состоящих из тригидрата азотной кислоты и льда. Было выявлено два механизма их появления (высота 20–25 км): первый обусловлен заносом облаков со стороны Скандинавии (традиционное место образования таких облаков), второй – их образованием над Западной Сибирью при понижении температуры ниже 195 К. Серебристые облака наблюдались за последние десять лет два раза, в 2008 и 2011 гг., на высотах 78 и 88 км.

Продолжены работы по теоретическому описанию рассеяния оптических потоков на кристаллических частицах перистых облаков. Испытана модель агрегатов, образованных из восьми гексагональных столбиков. Сравнение с экспериментальными данными показало не очень хорошее совпадение, что инициирует создание более сложных моделей агрегированных частиц.

Применительно к лазерному зондированию атмосферы фемтосекундными импульсами изучены процессы образования постфиламентационных световых каналов. Показано, что эти каналы несут излучение с малой расходимостью (около десятка микрорадиан) и широким спектральным составом. Тем самым обосновывается перспективность многочастотного лазерного зондирования атмосферы фемтосекундным излучением с образованием постфиламентационных каналов.

Наиболее интересным результатом прожекторного зондирования атмосферы стало обнаружение в атмосфере слоев, образованных кристаллическими частицами и проявляющими свойство зеркального отражения. Метеорологические условия формирования таких слоев предстоит еще уточнить.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

1. *Lidar:* Range-resolved optical remote sensing of the atmosphere / C. Weitkamp (ed.). Springer series in optical sciences. 2005. V. 102. 456 p.
2. *Прожекторный* луч в атмосфере / под ред. Г.В. Розенберга. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 244 с.
3. *Бобровников С.М., Матвиенко Г.Г., Романовский О.А., Сериков И.Б., Суханов А.Я.* Лидарный спектроскопический газоанализ атмосферы. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2014. 510 с.
4. *Лидарный* мониторинг облачных и аэрозольных полей, малых газовых составляющих и метеопараметров атмосферы / под ред. Г.Г. Матвиенко. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2015. 450 с.
5. *Матвиенко Г.Г., Балин Ю.С., Бобровников С.М., Романовский О.А., Коханенко Г.П., Самойлова С.В., Пеннер И.Э., Горлов Е.В., Жарков В.И., Садовников С.А., Харченко О.В., Яковлев С.В., Баженов О.Е., Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Макеев А.П., Невзоров А.А., Невзоров А.В.* Сибирская лидарная станция: аппаратура и результаты. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2016. 440 с.
6. *Serikov I., Bobrovnikov S.* Atmospheric temperature profiling with pure rotational Raman lidars / L. Fiorani, V. Mitev (eds.). Recents Advances in Atmospheric Lidars, INOE, 2010, P. 149–216.
7. *Васильев Б.И., Маннун У.М.* ИК-лидары дифференциального поглощения для экологического мониторинга окружающей среды // Квант. электрон. 2006. Т. 36, № 9. С. 801.
8. *Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Невзоров А.А., Невзоров А.В., Романовский О.А.* Восстановление профилей вертикального распределения концентрации озона из данных лидарного зондирования // Изв. вузов. Физика. 2015. Т. 58, № 8. С. 70–76.
9. *Долгий С.И., Невзоров А.А., Невзоров А.В., Макеев А.П., Романовский О.А., Харченко О.В.* Лидарный комплекс для измерения вертикального распределения озона в верхней тропосфере – стратосфере // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 9. С. 764–770.
10. *Романовский О.А., Садовников С.А., Харченко О.В., Яковлев С.В.* Широкодиапазонный ИК-лидар для газоанализа атмосферы // Журн. прикл. спектроск. 2018. Т. 85, № 3. С. 448–453.
11. *Romanovskii O.A., Sadovnikov S.A., Kharchenko O.V., Shumsky V.K., Yakovlev S.V.* Optical parametric oscillators in lidar sounding of trace atmospheric gases in the 3–4 μm spectral range // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). 2016. V. 25, N 2. P. 88–94.
12. *Matvienko G.G., Romanovskii O.A., Sadovnikov S.A., Sukhanov A.Ya., Kharchenko O.V., Yakovlev S.V.* Study of the possibility of using a parametric-light-generator-based laser system for lidar probing of the composition of the atmosphere // J. Opt. Technol. 2017. V. 84, N 6. P. 408–414.
13. *Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Иноуйе Г., Максютов Ш., Мачида Т., Фофонов А.В.* Вертикальное распределение парниковых газов над Западной Сибирью по данным многолетних измерений // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 5. С. 457–464; *Arshinov M.Yu., Belan B.D., Davydov D.K., Inouye G., Maksyutov Sh., Machida T., Fofonov A.V.* Vertical distribution of greenhouse gases above Western Siberia by the long-term measurement data // Atmos. Ocean. Opt. 2009. V. 22, N 3. P. 316–325.
14. *Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Креков Г.М., Фофонов А.В., Бабченко С.В., Inoue G., Machida T., Maksutov Sh., Sasakawa M., Shimoyama K.* Динамика вертикального распределение парниковых газов в атмосфере // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 12. С. 1051–1061.
15. *Изменение* климата, 2014. Обобщающий доклад. Резюме для политиков. URL: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/AR5_SYR_FINAL_SPM_ru.pdf (дата обращения: 7.02.2019).
16. *Allen M.R., Dube O.P., Solecki W., Aragyn-Durand F., Cramer W., Humphreys S., Kainuma M., Kala J., Mahowald N., Mulugetta Y., Perez R., Wairiu M., Zickfeld K.* Framing and Context. In: Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty / V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Con-

nors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.). In Press.
17. *Оценочный* доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. 1. Изменения климата. М.: Росгидромет, 2008. 246 с.
18. *Connor B., Bösch H., McDuffie J., Taylor T., Fu D., Frankenberg C., O'Dell C., Payne V.H., Gunson M., Pollock R., Hobbs J., Oyafuso F., Yibo Jiang.* Quantification of uncertainties in OCO-2 measurements of XCO_2: Simulations and linear error analysis // Atmos. Meas. Tech. 2016. V. 9. P. 5227–5238.
19. *Ehret G., Kiemle C., Wirth M., Amediek A.* Space-borne remote sensing of CO_2, CH_4, and N_2O by integrated path absorption lidar: A sensitivity analysis // J. Appl. Phys. 2008. V. 90. P. 593–608.
20. *Mao J., Ramanathan A., Abshire J.B., Kawa S.R., Riris H., Allan G.R., Rodriguez M., Hasselbrack W.E., Sun X., Numata K., Chen J., Choi Y., Mei Ying, Melissa Yang.* Measurement of atmospheric CO_2 column concentrations to cloud tops with a pulsed multi-wavelength airborne lidar // Atmos. Meas. Tech. 2018. V. 11. P. 127–140.
21. *Han G., Ma X., Liang A., Zhang T., Zhao Y., Zhang M., Gong W.* Performance Evaluation for China's Planned CO_2-IPDA // Remote Sens. 2017. V. 9. P. 768.
22. *Ehret G., Bousquet P., Pierangelo C., Alpers M., Millet B., Abshire J.B., Bovensmann H., Burrows J.P., Chevallier F., Ciais P., Crevoisier C., Fix A., Flamant P., Frankenberg Ch., Gibert F., Heim B., Heimann M., Houweling S., Hubberten H.W., Jöckel P., Law K., Löw A., Marshall J., Agusti-Panareda A., Payan S., Prigent C., Rairoux P., Sachs T., Scholze M., Wirth M.* MERLIN: A French-German space lidar mission dedicated to atmospheric methane // Remote Sens. 2017. N 9. P. 1052–1081.
23. *Caron J., Durand Y., Bézy J.-L., Meynard R.* Performance modelling for A-SCOPE // Proc. of SPIE. 2009. N 7479-13.
24. *Ingmann P.* A-Scope. Esa Report: Advanced Space Carbon and Climate Observation of Planet Earth, Report for Assessment; SP-1313/1; ESA/ESTEC: Noordwijk. The Netherlands. 2009.
25. *Matvienko G.G., Sukhanov A.Y.* Application of Neural Networks for Retrieval of the CO_2 Concentration at Aerospace Sensing by IPDA-DIAL lidar // Remote Sens. 2019. V. 11. P. 659.
26. *Бабченко С.В., Матвиенко Г.Г., Суханов А.Я.* Оценки возможностей зондирования парниковых газов CH_4 и CO_2 над подстилающей поверхностью IPDA лидаром космического базирования // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 1. С. 37–45; *Babchenko S.V., Matvienko G.G., Sukhanov A.Ya.* Assessing the possibilities of sensing CH_4 and CO_2 greenhouse gases above the underlying surface with satellite-based IPDA lidar // Atmos. Ocean. Opt. 2015. V. 28, N 3. P. 245–253.
27. *Суханов А.Я.* Решение обратной задачи DIAL-IPDA аэрокосмического лидарного зондирования углекислого газа на основе бионических методов // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 7. С. 589–597.
28. *Matvienko G.G., Krekov G.M., Sukhanov A.Ya.* Space-borne remote sensing ofgreenhouse gases by IPDA lidar: A potentialities estimate // 25th Intern. Laser Radar Conf. St.-Petersburg, 2010. P. S11P-02.
29. *Matvienko G.G., Sukhanov A.Ya.* Space-borne remote sensing of CO_2 by IPDA lidar with heterodyne detection: Random error estimation // Proc. SPIE. 2015. V. 9680. CID: 9680 4I.
30. *Klett D.* Stable analytical inversion solution for processing lidar returns // Appl. Opt. 1981. V. 20. P. 211–220.
31. *Fernald F.G.* Analysis of atmospheric lidar observations: Some comments // Appl. Opt. 1984. V. 23. P. 652–653.
32. *Hayman M., Spuler S., Morley B.* Polarization lidar observations of backscatter phase matrices from oriented ice crystals and rain // Opt. Express. 2014. V. 22, N 14. P. 16976–16990.
33. *Borovoi A., Konoshonkin A., Kustova N.* Backscattering reciprocity for large particles // Opt. Lett. 2013. V. 38, N 9. P. 1485–1487.
34. *Borovoi A., Konoshonkin A., Kustova N.* Backscatter ratios for arbitrary oriented hexagonal ice crystals of cirrus clouds // Opt. Lett. 2014. V. 39, N 19. P. 5788–5791.
35. *Borovoi A., Kustova N., Konoshonkin A.* Interference phenomena at backscattering by ice crystals of cirrus clouds // Opt. Express. 2015. V. 23, N 19. P. 24557–24571.
36. *Konoshonkin A., Wang Z., Borovoi A., Kustova N., Liu D., Xie C.* Backscatter by azimuthally oriented ice crystals of cirrus clouds // Opt. Express. 2016. V. 24, N 18. P. A1257–A1268.
37. *Konoshonkin A., Borovoi A., Kustova N., Reichardt J.* Power laws for backscattering by ice crystals of cirrus clouds // Opt. Express. 2017. V. 25, N 19. P. 22341–22346.
38. *Wang Z., Borovoi A., Konoshonkin A., Kustova N., Liu D., Xie C.* Extinction matrix for cirrus clouds in the visible and infrared regions // Opt. Lett. 2018. V. 43, N 15. P. 3578–3581.
39. *Ding J., Yang P., Holz R., Platnick S., Meyer K., Vaughan M., Hu Y., King M.* Ice cloud backscatter study and comparison with CALIPSO and MODIS satellite data // Opt. Express. 2016. V. 24, N 1. P. 620–636.
40. *Woste L., Wedekind C., Wille H., Rairoux P., Stein B., Nikolov S., Werner Ch., Niedermeier S., Schillinger H., Sauerbrey R.* Femtosecond atmospheric lamp // Laser und Optoelektronik. 1997. V. 29. P. 51–53.
41. *Rairoux P., Schillinger H., Niedermeier S. at el.* Remote sensing of the atmosphere using ultrashort laser pulses // Appl. Phys. V. B71. 2000. P. 573–580.
42. *Wolf Jean-Pierre, Bourayou R., Boutou V., Favre C. at el.* Teramobile: A Nonlinear Femtosecond Terawatt Lidar. Part 1 // Proc. ILRC 21, Quebec City, Canada. 2002. P. 47–50.
43. *Faye G., Kasparian J., Sauerbrey R.* Modifications to the lidar equation due to nonlinear propagation in air // Appl. Phys. 2001. V. B73. P. 157–163.
44. *Апексимов Д.В. и др.* Фемтосекундная атмосферная оптика / под общ. ред. С.Н. Багаева, Г.Г. Матвиенко. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010. 238 с.
45. *Апексимов Д.В., Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К.* Управление областью множественной филаментации тераваттных лазерных импульсов на стометровой воздушной трассе // Квант. электрон. 2015. С. 408–414.
46. *Апексимов Д.В., Землянов А.А., Иглакова А.Н., Кабанов А.М., Кучинская О.И., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Петров А.В.* Глобальная самофокусировка и особенности множественной филаментации излучения субтераваттного титан-сапфирового лазера с сантиметровым диаметром выходной апертуры на 150-метровой трассе // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 9. С. 727–732; *Apeksimov D.V., Zemlyanov A.A., Iglakova A.N., Kabanov A.M., Kuchinskaya O.I., Matvienko G.G., Oshlakov V.K., Petrov A.V.* Global self-focusing and features of multiple filamentation of ra-

diation of a subterawatt Ti:Sapphire laser with a centimeter output aperture along a 150-m path // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 1. P. 31–35.
47. *Апексимов Д.В., Землянов А.А., Иглакова А.Н., Кабанов А.М., Кучинская О.И., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Петров А.В., Соколова Е.Б.* Локализованные световые структуры с высокой интенсивностью при множественной филаментации фемтосекундного импульса титан-сапфирового лазера на воздушной трассе // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 11. С. 910–914; *Apeksimov D.V., Zemlyanov A.A., Iglakova A.N., Kabanov A.M., Kuchinskaya O.I., Matvienko G.G., Oshlakov V.K., Petrov A.V., Sokolova E.B.* Localized high-intensity light structures during multiple filamentation of Ti:Sapphire laser femtosecond pulses along an air path // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 2. P. 107–111.
48. *Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Степанов А Н., Суханов А.Я.* Моделирование переноса излучения методом Монте-Карло и решение обратной задачи на основе генетического алгоритма по результатам эксперимента зондирования аэрозолей на коротких трассах с использованием фемтосекундного лазерного источника // Квант. электрон. 2015. С. 145–152.
49. *Галилейский В.П., Гришин А.И., Колеватов А.С., Морозов А.М., Ошлаков В.К., Петров А.И.* Источник некогерентного широкоспектрального импульсного оптического излучения для зондирования тропосферы // XVIII Рабочая группа «Аэрозоли Сибири», 29 ноября – 2 декабря 2011 г., Томск.
50. *Галилейский В.П., Колеватов А.С., Морозов А.М.* Источник некогерентного импульсного оптического излучения для зондирования тропосферы // XIX Рабочая группа «Аэрозоли Сибири» 27–30 ноября 2012 г., Томск.
51. *Ошлаков А.К. Ошлаков В.К. Галилейский В.П., Колеватов А.С. Морозов А.М.* Оптический пробой воздуха излучением широкоспектрального источника света // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12, № 5. С. 449–452.

G.G. Matvienko, P.A. Babushkin, S.M. Bobrovnikov, A.G. Borovoi, D.A. Bochkovskii, V.P. Galilyskii, A.I. Grishin, S.I. Dolgii, A.I. Elizarov, D.V. Kokarev, A.V. Konoshonkin, A.V. Kryuchkov, N.V. Kustova, A.V. Nevzerov, V.N. Marichev, A.M. Morozov, V.K. Oshlakov, O.A. Romanovskii, A.Ya. Sukhanov, D.A. Trifonov, S.V. Yakovlev, S.A. Sadovnikov, A.A. Nevzorov, O.V. Kharchenko. **Laser and optical sensing of atmosphere.**

Lidar and searchlight instruments and methods of atmospheric research development at V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, in recent years are described. Key results received with the use of these means are presented.

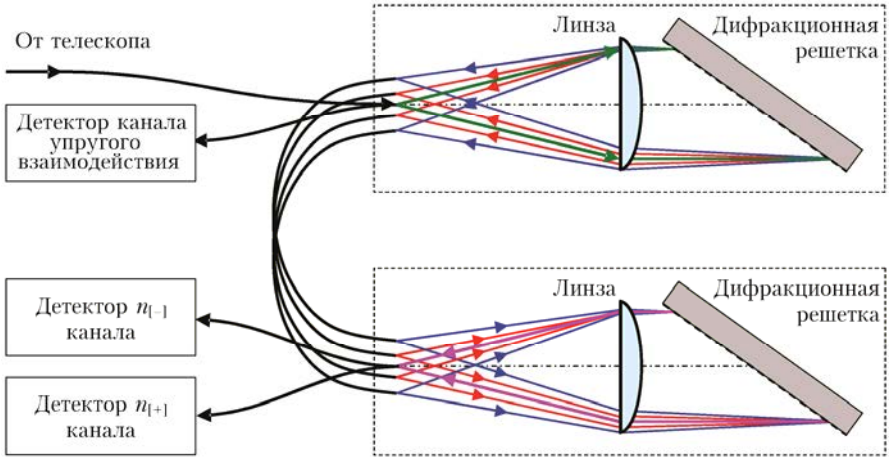


Рис. 3. Принципиальная оптическая схема двойного полихроматора с дифракционными решетками и волоконно-оптической передачей оптических сигналов

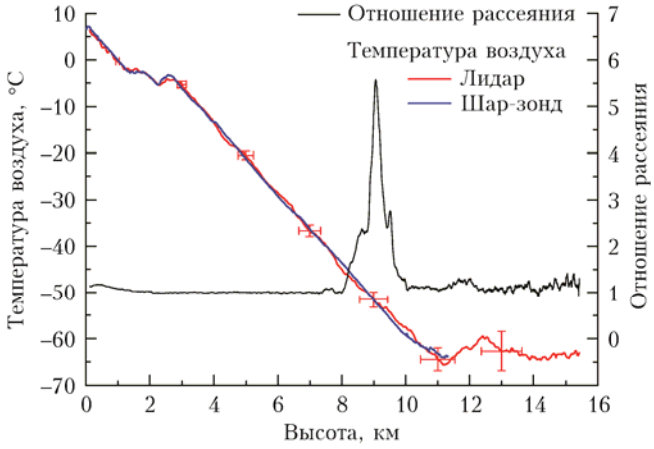


Рис. 4. Высотный ход температуры атмосферы, полученный с помощью лидара и шара-зонда, и отношение рассеяния на $\lambda = 532$ нм. Лидарные измерения: 10:00–12:00 UTC; запуск шара-зонда: 11:52–12:58 UTC, ALOMAR, 11 апреля 2009 г. (связь воздушного шара с наземной станцией была потеряна на высоте 11,3 км)

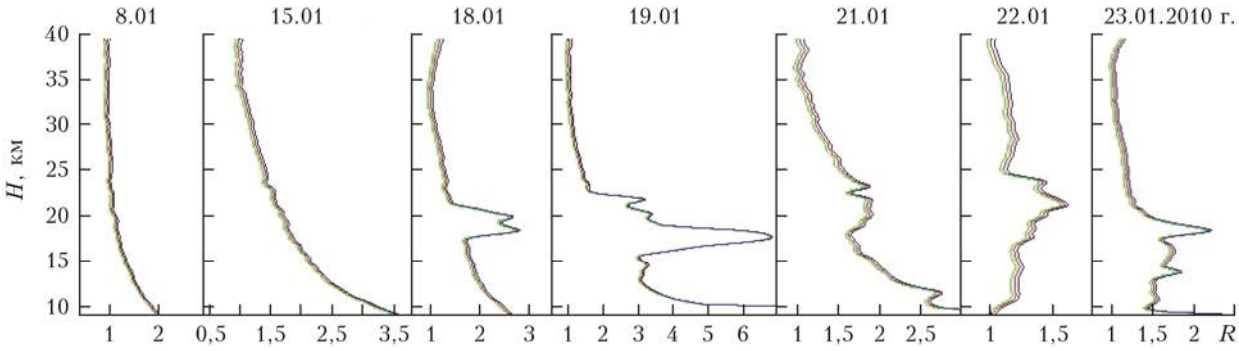


Рис. 8. Динамика вертикальной стратификации аэрозоля в январе 2010 г.

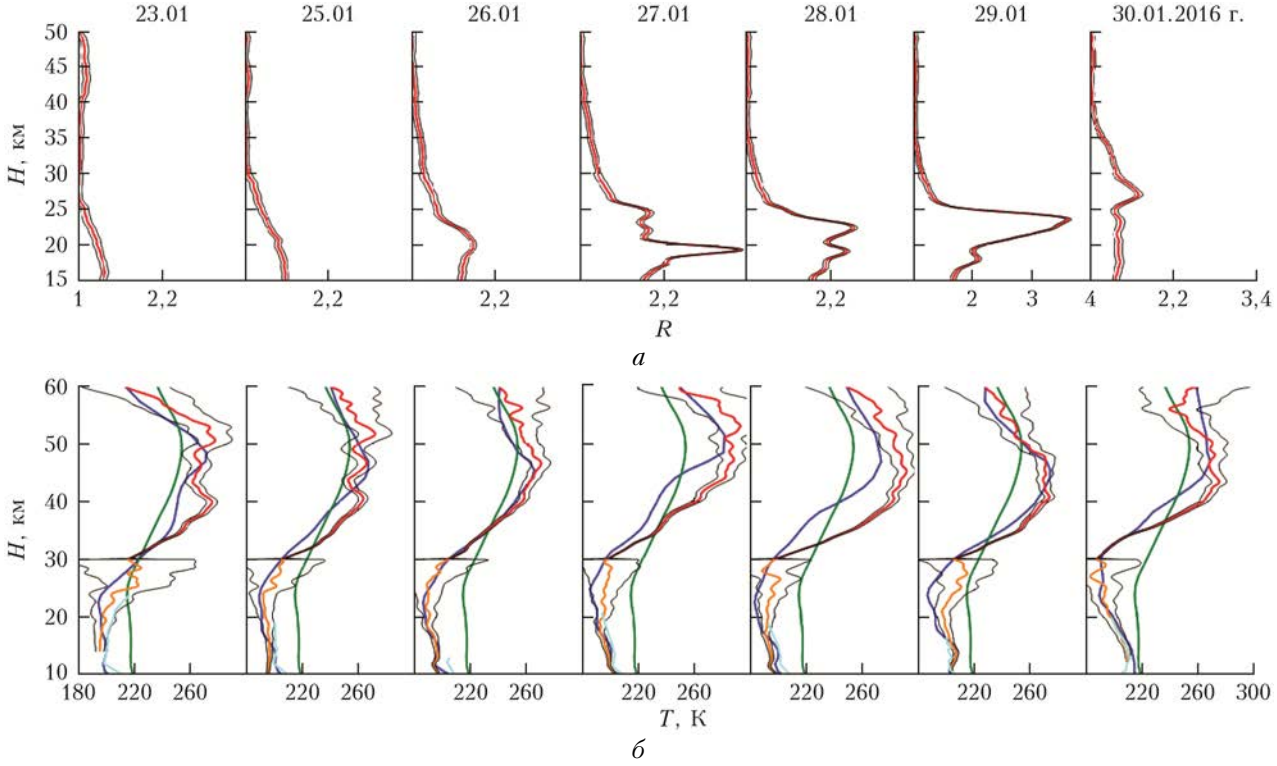


Рис. 9. Данные измерений в январе 2016 г.: *а* – динамика вертикальной стратификации аэрозоля; *б* – профили температуры: красный – лидарный рэлеевский; оранжевый – лидарный рамановский; синий – спутник AURA; голубой – радиозонд; зеленый – модель CIRA-86

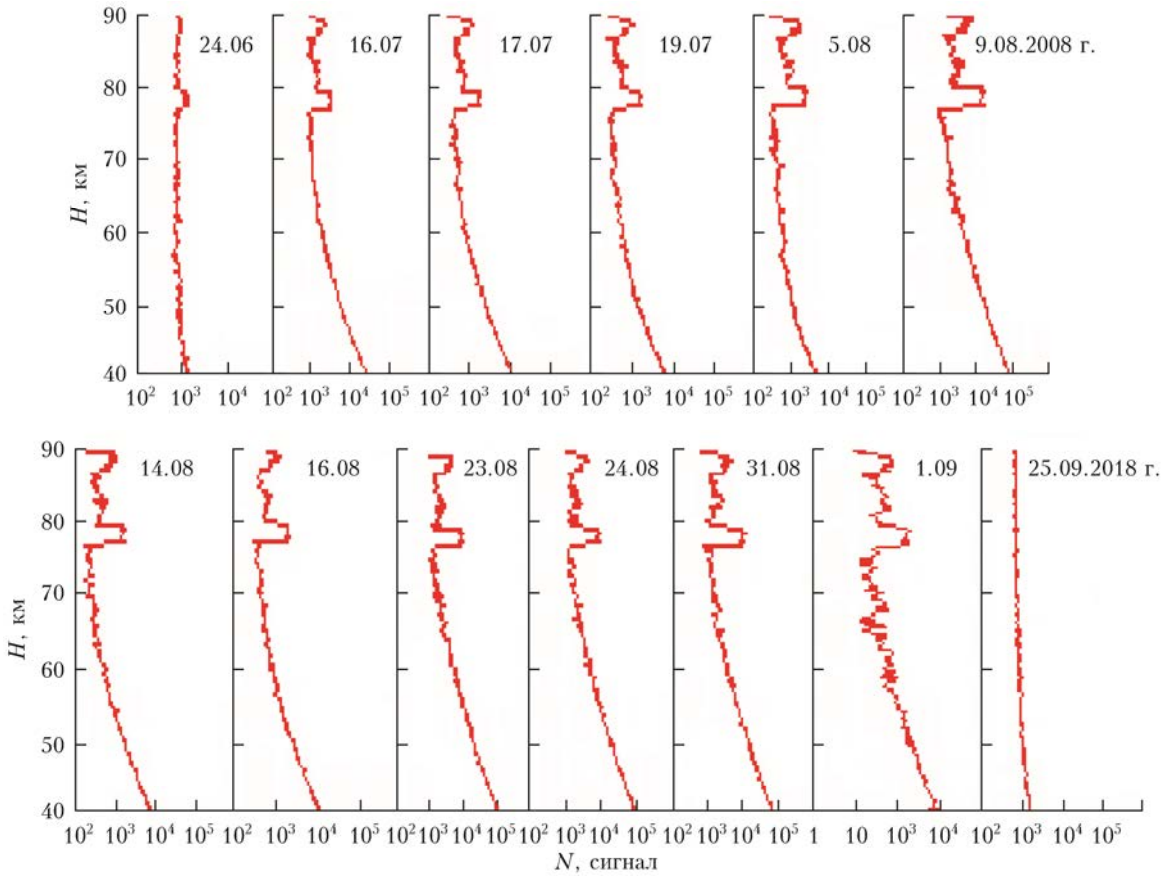


Рис. 10. Лидарные сигналы от серебристых облаков, зарегистрированные летом 2008 г.

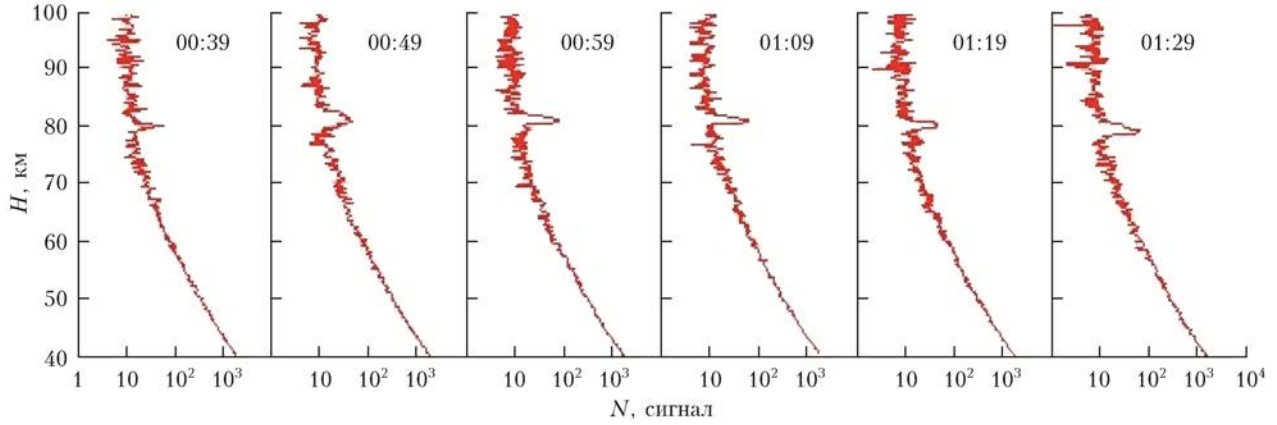


Рис. 11. Лидарные сигналы от серебристых облаков, зарегистрированные в ночь 4 июля 2011 г. Время наблюдений — местное

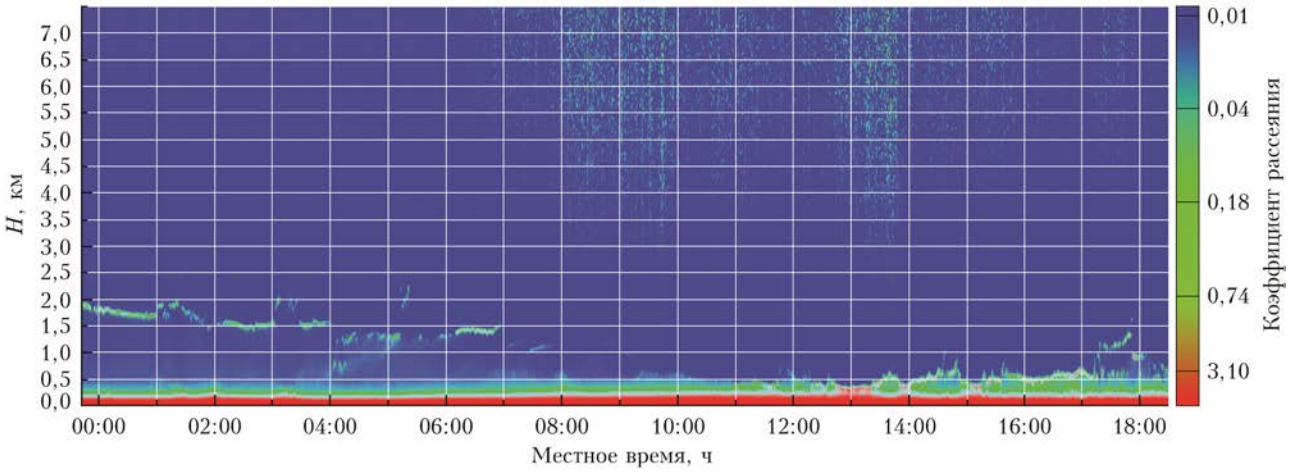


Рис. 12. Временной ход коэффициента рассеяния (альфа) для слабоградиентного барического поля

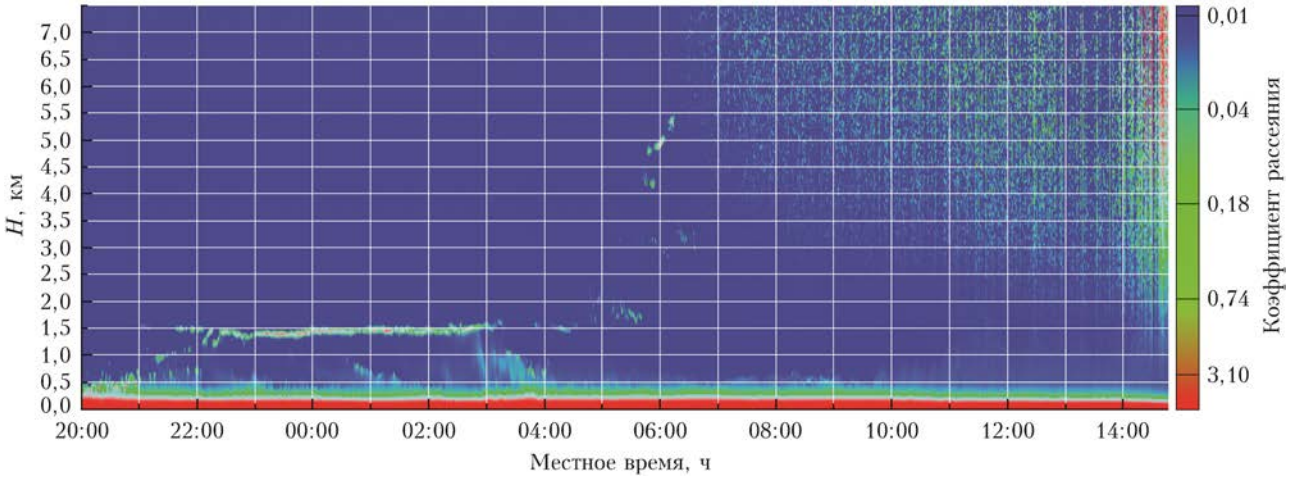


Рис. 13. Временной ход коэффициента рассеяния в условиях антициклональной погоды

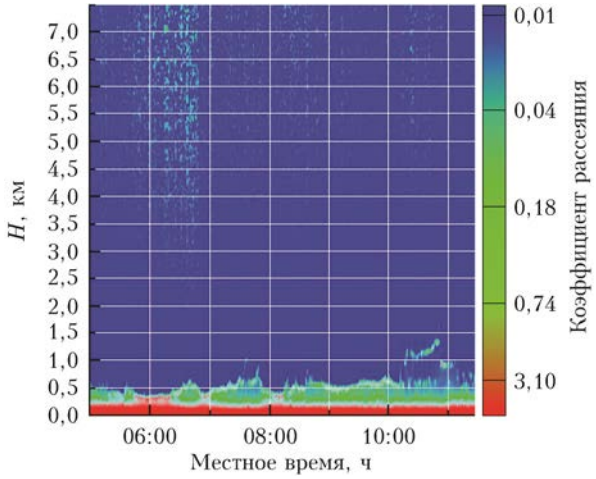
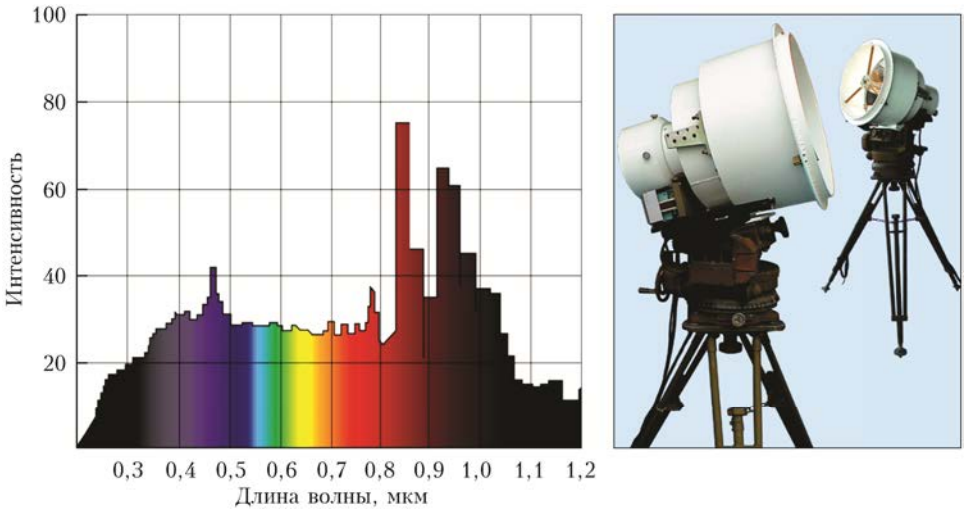
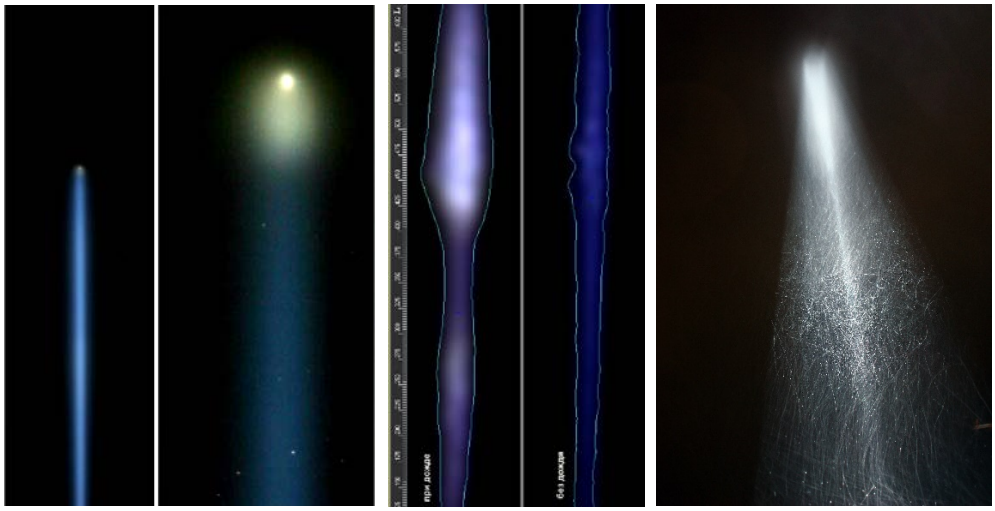


Рис. 14. Временной ход коэффициента рассеяния в условиях циклональной погоды



а *б*

Рис. 21. Типичный спектр излучения короткодуговой ксеноновой лампы сверхвысокого давления (*а*); созданный в ИОА СО РАН макет средства широкоспектрального зондирования атмосферы (*б*)



а *б* *в*

Рис. 22. Результаты взаимодействия широкоспектрального направленного оптического излучения прожекторной установки с атмосферными частицами: *а* — при зеркальном отражении от ледяных частиц; *б* — уширение прожекторного луча во время дождя за счет многократного рассеяния на углы радуг; *в* — траектории движения частиц во время дождя