

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский государственный университет»

На правах рукописи



Брюханов Илья Дмитриевич

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБЛАКОВ ВЕРХНЕГО ЯРУСА  
ЕСТЕСТВЕННОГО И АНТРОПОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ,  
СОДЕРЖАЩИХ ОРИЕНТИРОВАННЫЕ КРИСТАЛЛЫ ЛЬДА, ПО ДАННЫМ  
ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Специальность 1.3.6 – Оптика

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата физико–математических наук

Научный руководитель  
д-р физ.–мат. наук, проф.  
Игнатий Викторович Самохвалов

Томск – 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Глава 1 ОБЛАКА ВЕРХНЕГО ЯРУСА ЕСТЕСТВЕННОГО И АНТРОПОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ	18
1.1 Механизмы формирования и морфологические признаки облаков верхнего яруса	18
1.2 Особенности формирования и строения облаков верхнего яруса	22
1.3 Образование и эволюция конденсационных следов самолётов	24
1.4 Влияние облаков верхнего яруса на перенос радиации в атмосфере	28
1.5 Поляризационные лидарные исследования облаков верхнего яруса	32
Основные выводы по главе 1	42
Глава 2 ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЛАКОВ ВЕРХНЕГО ЯРУСА	44
2.1. Метод поляризационного лазерного зондирования атмосферы	44
2.1.1. Уравнение лазерного зондирования в векторной форме	45
2.1.2. Приборный вектор	46
2.2. Высотный матричный поляризационный лидар Томского государственного университета	48
2.3. Экспериментальное определение компонентов вектора- параметра Стокса принимаемого излучения и матрицы обратного рассеяния света облака	53
2.4. Процедуры обработки результатов лидарных экспериментов и их программная реализация	58
2.4.1. Выбор временного интервала измерений для анализа	59
2.4.2. Определение высот нижней и верхней границ, отношения рассеяния и оптической толщи ОВЯ	61
2.4.3. Преобразования МОРС ОВЯ	63

2.5. Метеорологические условия формирования облаков верхнего яруса и их сопоставление с результатами лидарных экспериментов	70
2.6. Расчёт параметров дрейфа конденсационных следов самолётов	72
2.7. Временная коррекция данных комплексных лидарно-актинометрических экспериментов	76
Основные выводы по главе 2	81
Глава 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЛАКОВ ВЕРХНЕГО ЯРУСА	82
3.1. Обнаружение и исследование характеристик зеркальных и незеркальных областей в облаках верхнего яруса	83
3.2. Оптические характеристики ОВЯ и метеорологические условия формирования преимущественной горизонтальной ориентации ледяных частиц в них	88
3.3. Оптические характеристики конденсационных следов самолётов по данным лидарных и аэрологических измерений	93
3.4. Влияние зеркальных облаков верхнего яруса на потоки рассеянной солнечной радиации в околоразенитной области	104
Основные выводы по главе 3	113
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	114
Список использованных источников и литературы	117

## ВВЕДЕНИЕ

### Актуальность работы

Изменения климата повышают значимость исследований атмосферных процессов. Учёные разных стран прогнозируют изменение продолжительности сезонов года [1], охлаждение океанических течений [2], практически полное освобождение Арктики ото льда [3] и даже ограничение полётов самолётов из-за потери подъёмной силы крыла при росте температуры воздуха [4]. Вместе с тем, модели атмосферы, используемые при прогнозировании погоды и климата, всё ещё не обеспечивают требуемую точность. Прежде всего, это вызвано малой изученностью ряда атмосферных явлений и процессов.

Облачность является не только регулятором радиационного баланса в климатической системе Земли, но и важнейшим фактором, определяющим поступление солнечной энергии к её поверхности. Климатические последствия роста облачности – изменение радиационного баланса атмосферы и повышение температуры у поверхности Земли. Увеличение облачного покрова на 10% приводит к повышению температуры у поверхности Земли на 1,2–1,4 К [5]. Расчёты потоков солнечной радиации с использованием теоретических моделей облачности и самолётные измерения радиации на различных уровнях показывают значительные расхождения по величине поглощённой облаками энергии в коротковолновой области спектра. Ошибки определения характеристик микроструктуры облаков приводят к неточности расчётов радиационных потоков и неопределённости в оценках тенденций изменения климата [6, 7]. Весьма вероятной причиной расхождения является несовершенство микрофизической модели облаков, а именно: неучёт ориентации несферических ледяных частиц в смешанных и кристаллических облаках.

Важная роль облаков верхнего яруса (ОВЯ) в климатообразовании и, в частности, в усилении парникового эффекта, общепризнана [8–10]. ОВЯ состоят, в основном, из несферических ледяных частиц [11, 12], которые при определённых условиях ориентируются своими наибольшими гранями

горизонтально. Это приводит к увеличению коэффициентов отражения и аномальному (зеркальному) обратному рассеянию оптического излучения, падающего на грани частиц нормально [13, 14]. В существующих моделях атмосферы, в том числе, в глобальной оперативной модели атмосферы ПЛАВ (ПолуЛагранжева, основанная на уравнении Абсолютной завихренности) Гидрометцентра России, разработанной в Институте вычислительной математики РАН [15], а также в глобальной модели атмосферы Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF), особенности микроструктуры ОВЯ не учитываются. Определение параметров микроструктуры облаков – задача нетривиальная вследствие многообразия форм ледяных частиц в них и сложности математического описания их распределений по размерам. Как правило, используется понятие «эффективного радиуса», основанное на равенстве одной из характеристик частиц и некоторой модельной сферы [10]. Это упрощение позволяет использовать теорию Ми при расчёте радиационных характеристик ОВЯ, но, по-видимому, является достаточно грубым и приводит к ошибкам в синоптических и климатических прогнозах.

Значимость влияния ОВЯ на пропускание атмосферой оптического излучения определяется их горизонтальной протяжённостью, принимающей значения до тысячи километров [12], вследствие чего в каждый момент времени они могут покрывать, по разным оценкам, от 20–30 [8, 16] до 50% [7, 13] поверхности нашей планеты. Такие облака отличаются наиболее низкими температурами образования и малой оптической толщиной, а также в умеренных широтах им характерны высоты формирования 5–8 и 7–10 км для зимнего и тёплого времени года соответственно [17]. Воздействие облаков на оптическое излучение определяется параметрами их микроструктуры, а именно размерами, формой и пространственной ориентацией несферических ледяных частиц в них. Наиболее часто наблюдаемой формой ОВЯ являются перистые облака. Характерные для их образования погодные условия могут значительно отличаться в зависимости от времени года и широты [18]. Так, синоптические

возмущения, вызванные струйными потоками, связывают чаще всего с перистой облачностью в средних широтах. В то же время, образование таких облаков вследствие тропической конвекции весьма маловероятно [19]. ОВЯ, состоящие из преимущественно горизонтально ориентированных ледяных кристаллов, представляют особый интерес вследствие аномального обратного рассеяния такими облаками при малой оптической толщине, из-за чего они получили название зеркальных [13, 20–21].

Оптическими свойствами, схожими с ОВЯ естественного происхождения, обладают и конденсационные следы самолётов. Они не только сами ослабляют потоки солнечного излучения, но и формируют перистую облачность [22]. Самолётные следы, существующие более 10 минут, названы Всемирной метеорологической организацией единственным искусственным типом ледяных облаков [23]. Многолетние наблюдения ОВЯ в северных широтах [22] показали увеличение их частоты образования с ростом авиационного трафика. Инструментальные исследования характеристик самолётных следов затруднены, поскольку контактные приборы, размещаемые на авиационных носителях, малоинформативны (например, при заборе проб теряется информация об ориентации ледяных частиц), а с космических платформ следы самолётов на начальной стадии формирования не различимы в силу их небольших поперечных размеров. Следы становятся доступными для наблюдения спутниковыми средствами спустя 1–2 ч после выброса продуктов сгорания топлива двигателями самолёта, что неудовлетворительно много, поскольку среднее время существования конденсационного следа составляет около 1–6 ч [24].

Необходимость разработки оптических моделей кристаллических ОВЯ естественного и антропогенного происхождения, адекватно отражающих их микрофизические характеристики, определяет актуальность данной работы. Максимум информации о микрофизических параметрах ансамбля частиц, доступной для получения в эксперименте по рассеянию света, содержится в матрице рассеяния света (MPC) [25]. С помощью поляризационного лидара

возможно «измерение» МРС для углов, близких к направлению 180 градусов, которую называют матрицей обратного рассеяния света (МОРС). Метод поляризационного лазерного зондирования (ПЛЗ) [26], в основе которого лежит определение МОРС, информативен к форме и ориентации частиц льда в ОВЯ.

**Объектом исследования** являются облака верхнего яруса естественного и антропогенного происхождения, образованные преимущественно горизонтально ориентированными в пространстве ледяными частицами.

**Предметом исследования** является связь оптических и микрофизических характеристик зеркальных облаков верхнего яруса естественного и антропогенного происхождения с метеорологическими условиями их образования и влияние таких облаков на потоки солнечной радиации в приземном слое.

**Проблемная ситуация** заключается в отсутствии систематизированных экспериментальных данных об оптических характеристиках ОВЯ естественного и антропогенного происхождения, содержащих ориентированные кристаллические частицы льда, а также в отсутствии экспериментальных данных о влиянии зеркальных ОВЯ на потоки солнечной радиации в приземном слое атмосферы.

**Целью диссертационной работы** является экспериментальное исследование оптических и микрофизических характеристик зеркальных облаков верхнего яруса естественного и антропогенного происхождения при различных метеорологических условиях и оценка их влияния на потоки солнечной радиации в приземном слое.

Реализация этой цели включала в себя решение **следующих задач:**

- разработка алгоритмов и программного обеспечения для получения и обработки больших массивов экспериментальных данных, необходимых для определения оптических (МОРС) и микрофизических (ориентация кристаллических частиц льда) характеристик ОВЯ;
- разработка методики обнаружения, идентификации конденсационных

- следов самолётов стационарным вертикально ориентированным поляризационным лидаром и определение пространственно-временной изменчивости их оптических и микрофизических характеристик;
- получение и анализ массива данных поляризационного лазерного зондирования ОВЯ и соответствующих вертикальных профилей метеорологических величин для выявления сезонной изменчивости характеристик таких облаков;
  - исследование влияния микро- и пространственно-временной структуры ОВЯ на потоки солнечной радиации у поверхности Земли на основе комплексных лидарно-пиранометрических экспериментов.

**Исходные данные и методы исследования.** В работе использовались результаты лидарных измерений, выполненных в научно-исследовательской лаборатории лазерного зондирования (НИЛ ЛЗ) Национального исследовательского Томского государственного университета (НИ ТГУ) в 2016–2020 гг. Кроме того, анализировались данные аэрологических измерений [27]) и траектории самолётов по данным ADS-B (англ. «Automatic dependent surveillance-broadcast» – автоматическое зависимое наблюдение-вещание) мониторинга [28]. Дополнительно использовались данные измерений потоков солнечной радиации в приземном слое Института мониторинга климатических и экологических систем (ИМКЭС СО РАН, г. Томск). При решении поставленных задач применялись натурный эксперимент, а также методы статистического анализа. Для обработки результатов измерений применялся пакет программ, разработанных автором и под его руководством; для ряда программных продуктов получены свидетельства о государственной регистрации. Траектории дрейфа облаков визуализировались в геоинформационной системе Google Earth.

### **Научные положения, выносимые на защиту**

1. В условиях Западной Сибири пространственная структура облаков верхнего яруса, содержащих ориентированные кристаллы льда, неоднородна в направлении горизонтального ветра: она включает



зеркальные и незеркальные локальные области; поперечные размеры зеркальных областей лежат в диапазоне от 4 до 30 км, при этом в 56% случаев они составляют около 10 км и в 96% случаев – от 4 до 20 км; высота формирования таких областей в 21% случаев составляет 6–7 км и в 58% случаев – 10–11 км.

2. До 75% конденсационных следов, существующих более 10 минут, содержат преимущественно горизонтально ориентированные ледяные частицы; такие следы регистрируются (на широте г. Томска) на высотах 7–12 км при температуре воздуха от  $-67$  до  $-52^{\circ}\text{C}$ ; время их существования от момента выхлопа к моменту регистрации лидаром составляет от 12 минут до 2 часов.
3. Зеркальные области перистого облака, содержащие горизонтально ориентированные кристаллы льда, существенно (более чем на 10%) уменьшают потоки рассеянной солнечной радиации, приходящей из околзенитной области небосвода, по сравнению с незеркальными участками этого же облака.

**Достоверность** результатов и выводов работы обосновывается статистической обеспеченностью массива экспериментальных данных (обработано 1495 серий измерений, в 231-ной серии зарегистрированы ОВЯ; идентифицирована 81 зеркальная область), сезонной повторяемостью, а также согласованностью с результатами других авторов [29, 30] в части доли зеркальных ОВЯ от общего количества зарегистрированных. При статистической обработке и анализе накопленного массива экспериментальных данных применялось стандартное программное обеспечение: табличный процессор Microsoft Excel и пакет программ численного анализа и графики Origin (разработчик – OriginLab Corporation).

**Научная новизна результатов работы.** Установлено, что зеркальные локальные области ОВЯ имеют характерные размеры от 4 до 30 км. На основе построенных гистограмм функций распределения вероятностей оптических характеристик (отношение рассеяния, оптическая толщина, элемент  $m_{44}$  МОРС)

ОВЯ оценена повторяемость их значений. Определено, что до 75% конденсационных следов самолётов, существующих более 12 минут, содержат горизонтально ориентированные частицы льда, причём это свойство проявляется в течение 2 часов после выброса продуктов сгорания из двигателей. Показано, что зеркальные области ОВЯ существенно уменьшают поток рассеянной солнечной радиации в зените по сравнению с незеркальными при сопоставимых значениях оптической толщи.

**Научная значимость работы** обусловлена необходимостью получения экспериментальных данных о связи оптических и микрофизических характеристик зеркальных ОВЯ естественного и антропогенного происхождения с метеорологической обстановкой, которые крайне важны для разработки климатических моделей и верификации результатов теоретических расчётов приходящей и уходящей радиации. Доказано, что часто используемая в моделях атмосферы однородность ОВЯ условна; в горизонтально протяжённых облаках обнаружены локальные области с преимущественно ориентированными ледяными частицами; сделаны оценки характерных размеров зеркальных областей. Впервые показано, что до 75% конденсационных следов самолётов спустя время от 12–15 минут до 2 часов после выхлопа являются зеркальными, что должно учитываться в климатических моделях, особенно для регионов с высокой плотностью авиатрафика, а также для арктических районов, где парниковый эффект усиливается не только зеркальными облаками, но и снежно-ледяным покровом.

**Практическая значимость работы.** Получен статистически значимый массив экспериментальных данных для различных сезонов по оптическим характеристикам (отношение рассеяния, оптическая толщина, элемент  $m_{44}$  МОРС) ОВЯ. Результаты могут быть использованы для повышения точности расчёта радиационного баланса атмосферы вследствие адекватного учёта влияния ОВЯ естественного и антропогенного происхождения на потоки солнечной радиации.

## **Использование результатов работы и их внедрение**

Результаты работы были использованы при выполнении:

- АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы на 2009–2011 годы», проекты № 2.1.1/6939 и 2.1.1/13333;
- ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы», госконтракты № 16.518.11.7048 от 12.05.2011 г. и № 14.518.11.7053 от 20.07.2012 г.;
- ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы», соглашение № 14.В37.21.0612 от 16.08.2012 г.;
- НИР в рамках программы «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» («УМНИК») Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, договоры (соглашения) № 1917ГУ1/2014 от 15.04.2014 г. и № 7730ГУ2/2015 от 8.10.2015 г.;
- НИР № 1975 в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки РФ в сфере научной деятельности (2014–2016 гг.);
- грантов РФФИ № 16-05-00710 (2016–2018 гг.) и 19-45-700008 (с 2019 г.);
- гранта РНФ № 21-72-10089 (с 2021 г.).

**Личный вклад автора.** Автор планировал и выполнял эксперименты на высотном поляризационном лидаре НИ ТГУ, обрабатывал и систематизировал экспериментальные данные. Совместно с С.Н. Волковым (Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, ИОА СО РАН, г. Томск) усовершенствовал методику обработки результатов измерений на лидаре НИ ТГУ в части визуализации результатов измерений и расчётов компонентов вектора-параметра Стокса и матрицы обратного рассеяния света.

Кроме того, автор разработал и программно реализовал ряд алгоритмов,

используемых при планировании лидарных измерений и обработке их результатов:

- оценки геометрических и оптических характеристик облаков на основе лидарных данных, а также оценки метеорологической обстановки на основе данных аэрологических измерений вертикальных профилей метеорологических величин для соответствующих даты, времени и высоты;
- коррекции лидарных сигналов на многократное рассеяние (на основе методики Б.В. Кауля [26]);
- мониторинга авиационной обстановки в месте расположения лидара и планирования лидарных экспериментов;
- временной коррекции данных пиранометрии при их сопоставления с результатами лидарных измерений.

Автор разработал алгоритм расчёта параметров дрейфа конденсационных следов самолётов и программно реализовал его совместно с О.Ю. Локтюшиным (НИ ТГУ). Автором выделены и обработаны данные непрерывных (дневных) лидарных экспериментов и сопоставлены с результатами измерений суммарных потоков солнечной радиации, выполняющихся С.В. Зуевым (ИМКЭС СО РАН, г. Томск).

**Апробация результатов.** Результаты исследований по теме диссертации докладывались автором на VIII Всероссийском симпозиуме “Контроль окружающей среды и климата” КОСК-2012 (Томск, 2012 г.); 50–53, 55 Международных научных студенческих конференциях МНСК (Новосибирск, 2012–2015, 2017 гг.); 4–7, 9 Международных конференциях “Актуальные проблемы радиофизики” (Томск, 2012, 2013, 2015, 2017, 2021 гг.); XXI, XXIII, XXV, XXIX Международных конференциях “Лазерно-информационные технологии (в медицине, биологии и геоэкологии и транспорте)” (Новороссийск, 2013, 2015, 2017, 2021 гг.); Всероссийской конференции студенческих научно-исследовательских инкубаторов (Томск,

2014 г.); XX–XXVII Международных симпозиумах “Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы” (Новосибирск, 2014 и 2019 гг.; Томск, 2015, 2016 и 2018 гг.; Иркутск, 2017 г.; Москва, 2020 и 2021 гг.); Международном научном форуме молодых учёных “Наука будущего. Наука молодых” (Севастополь, 2015 г.); VII и X Международных конференциях “Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений” (с. Паратунка, Камчатский край, 2016 и 2019 г.); 24 Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых учёных (Томск, 2018 г.); V и VI Всероссийских научных конференциях “Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды” (Санкт-Петербург, 2018 и 2020 гг.); Международном симпозиуме «Атмосферная радиация и динамика» (МСАРД-2019) (Санкт-Петербург, 2019 г.); XXXII Всероссийском симпозиуме «Радиолокационное исследование природных сред» (Санкт-Петербург, 2021 г.); XIV Сибирском совещании и школе молодых учёных по климато-экологическому мониторингу (Томск, 2021 г.).

### **Публикации**

Материалы диссертации и основные результаты работы опубликованы в 45 работах, включая 6 статей в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук (из них 4 статьи в российских научных журналах, переводная версия которых входит в Web of Science), 24 статьи в сборниках материалов конференций, представленных в изданиях, входящих в Web of Science, 9 статей в прочих научных журналах (из них 5 статей в спецвыпуске к научному журналу). Получено 6 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка

литературы из 180 наименований. Общий объём работы – 138 страниц, включая 46 рисунков, 12 таблиц.

### **Содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы; сформулированы цель и основные задачи исследования; приведены защищаемые положения; дана оценка научной новизны полученных результатов и их научной и практической значимости; приведены сведения об апробации работы; представлен краткий обзор структуры диссертации.

**В первой главе** диссертации рассмотрены механизмы формирования и морфологические признаки ОВЯ, а также особенности образования и эволюции конденсационных следов самолётов. Особое внимание уделено влиянию ОВЯ естественного и антропогенного происхождения на перенос лучистой радиации в атмосфере. Приведён обзор методов и средств поляризационных лидарных исследований таких облаков. Показано, что ни одна из известных установок, за исключением лидара НИ ТГУ, не позволяет измерить совокупность из 16 лидарных сигналов, необходимых для определения полной МОРС ОВЯ. Вместо этого, измеряется, в лучшем случае, 9 элементов МОРС, а остальные 7 рассчитываются с использованием математических соотношений между элементами МОРС, вытекающих из теории рассеяния электромагнитных волн частицами в направлении 180 градусов.

**Во второй главе** описаны метод ПЛЗ атмосферы, положенный в основу диссертационного исследования, и высотный матричный поляризационный лидар (ВМПЛ) НИ ТГУ, реализующий его. Рассмотрены методики и оригинальное программное обеспечение, используемые для получения, обработки и интерпретации лидарных данных. Описана методика оценки метеорологической обстановки на высотах исследуемых ОВЯ по данным аэрологических измерений [27]. Изложены методические вопросы, связанные с исследованием конденсационных следов самолётов стационарным лидаром, ориентированным в зенит. В радиусе 100 км от Томска расположен ряд авиационных трасс [28]. При благоприятных (для зондирования)

метеорологических условиях образовавшиеся следы самолётов дрейфуют к лидару, что позволяет изучать их геометрические и оптические характеристики. Методика идентификации следов самолётов и алгоритм расчёта характеристик дрейфа основаны на совместном анализе траекторий полётов самолётов [28], а также аэрологических [27] и лидарных данных. Описан алгоритм приведения к единой временной оси и совместного анализа результатов комплексных экспериментов, выполняемых одновременно на ВМПЛ НИ ТГУ и зенитном пиранометре ИМКЭС СО РАН, разнесённых на 6 км. По лидарным данным оцениваются высоты облаков, для которых по аэрологическим данным определяются характеристики ветра. Время дрейфа исследуемого участка облачного поля от лидара к пиранометру (или наоборот) оценивается на основе известного расстояния между ними и проекции вектора скорости ветра на направление «лидар–пиранометр».

**Третья глава** посвящена исследованиям оптических характеристик ОВЯ естественного и антропогенного происхождения с применением ВМПЛ НИ ТГУ. Использовались данные измерений, выполненных с параллельным накоплением 16-ти лидарных сигналов, необходимых для определения полной МОРС. В работе проанализированы данные лидарных измерений 2016–2020 гг. (около 1500 серий). Отобрано более 230 серий, в течение которых регистрировались ОВЯ, обнаружена 81 их зеркальная локальная область. Получено сезонное распределение частоты наблюдения зеркальных ОВЯ. На основе лидарных и аэрологических данных оценены поперечные размеры зеркальных областей. Относительная доля зеркальных областей наибольшего размера (~30 км) составляет 2%. Наименьший обнаруженный размер зеркальной области составляет ~4 км.

Обобщены данные об оптических характеристиках ОВЯ и метеорологической обстановке регистрации зеркальных ОВЯ в течение указанного пятилетнего периода. В выборке оказалось около 30% ОВЯ с признаками зеркальности, что повторяет выводы более ранних измерений в Томске [29]. Схожие оценки сделаны для Западной Сибири по данным

спутника CALIPSO [30]. Это подтверждает статистическую значимость полученной выборки и достоверность выводов, сделанных на основе её анализа. Наиболее часто зеркальные ОВЯ наблюдались на высотах 6–7 и 10–11 км при значениях температуры и точки росы  $-60\dots-50^{\circ}\text{C}$  и  $-70\dots-60^{\circ}\text{C}$  соответственно, а также при относительной влажности воздуха 30–40%. Характерные сезоны наблюдения – зима и осень, несмотря на то, что весной и летом лидарные измерения выполнялись чаще.

Приведены результаты исследования эволюции оптических и микрофизических характеристик конденсационных следов самолётов. Выявлено, что с сентября 2019 г. по апрель 2020 г. 61% следов (всего 36612) в радиусе 100 км от Томска дрейфовали в направлении точки стояния ВМПЛ НИ ТГУ. Доля зеркальных следов среди зарегистрированных лидаром составила 75%; на высотах их дрейфа воздух имел температуру от  $-67$  до  $-52^{\circ}\text{C}$  и относительную влажность 22–50%. Зеркальные следы регистрировались спустя время от 12 минут до 1 часа 58 минут с момента выброса отработанных газов двигателями самолёта. Незеркальные следы регистрировались при температуре от  $-50$  до  $-36^{\circ}\text{C}$  и относительной влажности 44–57% и существовали к моменту регистрации от 50 минут до 1 часа 45 минут. Таким образом, самолётные следы с большей вероятностью становятся зеркальными на начальных стадиях формирования и при более низкой температуре по сравнению с незеркальными.

Описаны комплексные лидарно-пиранометрические исследования влияния ОВЯ на поток рассеянной солнечной радиации в зените. Использовались ВМПЛ НИ ТГУ и зенитный пиранометр (Z-пиранометр) ИМКЭС СО РАН. Выделялись временные интервалы регистрации лидаром зеркальных и незеркальных локальных областей ОВЯ и анализировалось изменение сигнала Z-пиранометра. Показано, что при близкой оптической толщине, оценённой по лидарным сигналам, поток рассеянной радиации по данным Z-пиранометра увеличивается, когда зеркальная часть облака



сменяется на незеркальную. Это можно объяснить лишь отражением в космос существенной доли падающей на зеркальную часть облака прямой радиации.

**В заключении** перечислены наиболее важные результаты, полученные в диссертационной работе.

## **Глава 1 ОБЛАКА ВЕРХНЕГО ЯРУСА ЕСТЕСТВЕННОГО И АНТРОПОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ**

В климатологии выделяют три главных климатических фактора (определяющих климат в любой точке земного шара): солнечная радиация, циркуляция атмосферы и рельеф местности [31]. В настоящее время общепризнано, что ОВЯ являются важной частью атмосферы, влияющей на потоки лучистой энергии, и, таким образом, на климат [8]. Их важность вызвана большой горизонтальной протяжённостью, принимающей значения до тысячи километров [12]. Несмотря на это, микроструктура таких облаков (параметры распределений ледяных частиц в них по форме, размерам и пространственной ориентации) остаётся недостаточно изученной, что является причиной упрощений микрофизических и оптических моделей атмосферы. Это несовершенство приводит к грубому учёту микроструктуры ОВЯ в численных моделях прогнозов погоды и климата, что неминуемо приводит к ошибкам. Учёт влияния таких облаков на радиационный баланс в климатических моделях атмосферы является важной нерешённой проблемой [32, 33]. Таким образом, создание модели атмосферы, учитывающей микрофизические параметры ОВЯ, является актуальной проблемой, требующей основательной проработки.

### **1.1 Механизмы формирования и морфологические признаки облаков верхнего яруса**

Наиболее часто наблюдаемым видом ОВЯ являются перистые облака. Имmlер с коллегами [34] отметили, что “нет чёткого определения того, что должно быть классифицировано как перистое облако”. Кроме того, Стром с соавторами подчеркнули [35], что “то, что идентифицируется одним прибором как облако, может быть распознано другим как безоблачный воздух”. Международная координационная группа лазерных исследований атмосферы (International Coordination Group on Laser Atmospheric Studies, ICLAS) даёт следующее определение: перистые облака, обнаруженные в лидарных измерениях – это слои частиц на высоте от 6 км в воздушной массе

с температурой  $-25^{\circ}\text{C}$  или холоднее, имеющие существенную временную и пространственную изменчивость [36]. Инструментальные наблюдения ОВЯ в средних широтах Земли показывают, что такие облака почти полностью состоят из несферических ледяных кристаллов различной формы: сплошных и полых ледяных столбиков, плит, пуль, розеток, агрегатов и ледяных кристаллов с неровными поверхностями [8]. Размеры этих частиц изменяются от десятков до тысяч микрон [9, 37, 38]. Образование перистых облаков нередко происходит вследствие выбрасывания водяного пара из авиационных двигателей и продуктов сгорания их топлива [12, 39–41]. В таком случае облако формируется, если воздух на данной высоте близок к насыщению. В конденсационных следах может наблюдаться явление гало [42].

ОВЯ образуются в верхней тропосфере в результате упорядоченного подъёма и адиабатического охлаждения воздуха, а также при турбулентном обмене [43]. Кроме того, необходимо наличие в зоне насыщения достаточного количества ядер конденсации или, при отрицательных температурах, ядер образования льда. Описанные условия возникают при фронтальных процессах (особенно вблизи центра циклона) и активной конвекции, когда наблюдаются восходящие движения в верхней тропосфере. На процесс образования таких облаков влияют не только турбулентный обмен, но и контрасты температуры и влажности [44]. Различные сочетания указанных процессов обуславливают многообразие видов ОВЯ. В циклонах такие облака наблюдаются всегда, велика вероятность их формирования и на атмосферных фронтах, а в однородных воздушных массах они наблюдаются реже (причём, чаще в тёплой воздушной массе, чем в холодной). Наиболее часто ОВЯ образуются в зоне тёплых фронтов в верхней тропосфере, под тропопаузой. Условия формирования таких облаков определяют и степень покрытия ими небосвода (балл облачности). Так, над центральными и передними частями развивающихся циклонов формируется облачность в 9–10 баллов (10 – максимальное значение). По мере удаления от их центров на сотни километров, а также над заполняющимися циклонами количество ОВЯ

уменьшается до 5–9 баллов. Над антициклонами количество таких облаков обычно не превышает 3–7 баллов [37].

В таблице 1.1 приведена международная морфологическая классификация ОВЯ. По морфологическим признакам среди ОВЯ выделяют перистые, перисто-кучевые и перисто-слоистые [17]. Перистые облака представляют собой отдельные волокнистые облака, часто тонкие и прозрачные, иногда с более плотными частями. Их осадки – мелкие ледяные кристаллы – образуют полосы падения, но не достигают поверхности Земли. Такие облака делят на два вида: волокнистые или нитевидные (*Сi fib*; имеют вид параллельных или, наоборот, перепутанных клубков волокон) и плотные (*Сi sp*; включают многие уплотнения неправильной формы, в которых волокнистая структура менее заметна). Среди нитевидных выделяют когтевидные (*Сi unc*; концы их нитей загнуты и утолщены), перепутанные (*Сi int*; облака в виде беспорядочно перепутанных нитей, а также клубков или пятен, разбросанных по небу) и хребтовидные (*Сi vert*; облака с более плотной средней частью в форме полосы, из которой волокна расходятся в стороны). Плотные перистые облака разделяют на образовавшиеся из наковален кучево-дождевых облаков (грозовые; *Сi ing*; представляют собой плотные перистообразные скопления, похожие на наковальни; часто наблюдаются после грозы) и хлопьевидные (*Сi floc*; облака в форме хлопьев, включенные в поле волокон перистых облаков). Перисто-кучевые облака (*Сс*) – более тонкие, состоящие из мелких волн, хлопьев и ряби или непосредственно переходящие в покров *Сi* или *Сs*. Осадки из таких облаков не выпадают. Чечевицеобразные облака (*Сс lent*) имеют вытянутую форму и гладкую поверхность, утончаются к краям. Кучевообразные (*Сс cuf*) выглядят как мелкие башенки или хлопья, растущие вверх. Хлопьевидные (*Сс floc*) имеют вид тонких белых полупрозрачных хлопьев. Нередко внешний вид *Сс* приобретают конденсационные следы самолётов. Перисто-слоистые облака (*Сs*) представляют собой белую или чуть голубоватую пелену с однородной или слегка волокнистой структурой. Они могут покрывать всё

небо. Осадки таких облаков не достигают Земли. Среди них различают волокнистые (Cs fib.) – пелена слегка волокнистой структуры, и туманообразные (Cs neb.) – однородная белая или голубоватая пелена, либо очень тонкая, либо очень плотная. В перисто-слоистых облаках нередко наблюдается гало (беловатые кольца вокруг Солнца или Луны), побочные Солнца и т.д., а при полёте над ними самолёта – нижнее Солнце [37].

Таблица 1.1 – Морфологическая классификация ОВЯ [17]

Форма	Вид	Разновидность
1 Перистые Cirrus (Ci)	1.1 Перистые волокнистые (нитевидные) Ci fibratus (Ci fib)	1.1.1 Перистые когтевидные Ci uncinus (Ci unc) 1.1.2 Перистые хребтовидные Ci vertebratus (Ci vert) 1.1.2 Перистые перепутанные Ci intortus (Ci int)
	1.2 Перистые плотные Ci spissatus (Ci sp)	1.2.1 Перистые образовавшиеся из наковален кучево-дождевых облаков Ci incus-genitus (Ci ing) 1.2.2 Перистые хлопьевидные Ci floccus (Ci floc)
2 Перисто-кучевые Cirrosumulus (Cc)	2.1 Перисто-кучевые волнистообразные Cc undulates (Cc und)	2.1.1 Перисто-кучевые чечевицеобразные Cc lenticularis (Cc lent)
	2.2 Перисто-кучевые кучевообразные Cc cumuliformis (Cc cuf)	2.2.1 Перисто-кучевые хлопьевидные Cc floccus (Cc floc)
3 Перисто-слоистые Cirrostratus (Cs)	3.1 Перисто-слоистые волокнистые Cs fibratus (Cs fib) 3.2 Перисто-слоистые туманообразные Cs nebulosus (Cs neb)	

Одиночные ОВЯ не всегда могут быть предвестниками изменения погоды. Однако, большое их количество может быть признаком приближающейся фронтальной системы или возмущения верхнего слоя воздуха [45]. Часто это служит предвестником скорого изменения погоды, как на благоприятную, так и наоборот. Такое изменение зависит от их вида, количества, расположения, направления и скорости движения.

В земной атмосфере ОВЯ обычно располагаются ниже тропопаузы. Высота их нижней границы возрастает от высоких широт к низким. В средних широтах в половине случаев она не превышает 7 км. Высота нижней границы имеет чётко выраженный сезонный ход: летом ОВЯ располагаются несколько выше (на несколько сотен метров, до 1,5 км), чем зимой. Обычно с увеличением количества таких облаков высота их нижних границ уменьшается, а вертикальная протяжённость – увеличивается. Аналогичным образом зависит от широты и высота верхней границы ОВЯ. В средних широтах она может достигать 12–14 км, а в экваториальных районах – даже 17 км. Примерно в 10–15% случаев такие облака проникают в стратосферу. В остальных случаях их верхняя граница располагается, в основном, в 2–3-километровом слое под тропопаузой. В южных районах примерно в 50% случаев вертикальная мощность ОВЯ составляет величины, меньшие 1 км. В более северных районах, где хорошо развита циклоническая деятельность, в 50% случаев мощность таких облаков превышает 1,5 км. В то же время, и в районе экватора можно встретить перистые облака с мощностью, большей 5–6 км [37].

Для фронтальных ОВЯ наибольшие горизонтальные размеры имеют зоны, связанные с облаками тёплого фронта (в среднем 550–600 км). Несколько меньшие расстояния покрывают зоны холодных фронтов окклюзии (в среднем 400–450 км), ещё меньшие – зоны холодных фронтов (100–120 км). При этом зафронтальная часть зон для всех типов фронтов имеет значительно меньшую ширину, чем предфронтальная. Самые крупные поля фронтальной верхней облачности наблюдаются, когда они сливаются в единую обширную зону, нередко распространяющуюся на всю область циклона в развитых углубляющихся циклонах [12].

## **1.2 Особенности формирования и строения облаков верхнего яруса**

Важная роль ОВЯ в системе климата Земли обусловлена способностью задерживать уходящее в космос длинноволновое излучение (парниковый

эффект) и отражать солнечное (эффект альбедо) [46]. Их радиационное воздействие связано с совместным влиянием этих эффектов и определяется микроструктурой облаков, а также свойствами облачных слоёв, такими как толщина, высота и температура [47]. Пропускание солнечной радиации облаками существенным образом зависит от ориентации несферических ледяных частиц в них [48].

Ветер оказывает существенное влияние на формирование, сохранение и распад ОВЯ, а также на их перенос в другие районы. Для формирования и сохранения такой облачности необходима активная адвекция влаги, воздух должен перемещаться с большими скоростями, особенно в осенний и зимний сезоны года [49, 50]. Скорость ветра при наличии ОВЯ может изменяться в широких пределах: от 20 до 200 км/ч и более, в отдельных случаях превышая 300 км/ч. Температура воздуха на их границах колеблется в широких пределах. Её средние значения в некоторых районах над территорией СССР изменялись от  $-46$  до  $-26^{\circ}$  на нижней границе и от  $-53$  до  $-39^{\circ}$  – на верхней. Средняя температура меняется с чётко выраженным годовым ходом с минимумом зимой и максимумом летом [12].

До начала 1970-х гг. было принято считать, что ОВЯ состоят только из кристаллов, поскольку они находятся в достаточно холодных слоях атмосферы. В тропических районах, где температура на высоте таких слоёв может быть много выше  $-30^{\circ}\text{C}$ , допускалось существование облаков смешанного фазового состава. Однако более поздние исследования позволили установить, что в перистых облаках могут присутствовать значительные количества частиц (сравнимые с концентрацией капель в ОВЯ) размерами в несколько микрометров [12]. Происхождение столь высокой концентрации частиц можно объяснить тем, что в перистых облаках при определенных условиях достигается насыщение над водой, что приводит к образованию капель. В дальнейшем, если температура опускается ниже температуры спонтанного замерзания капель ( $T \approx -41^{\circ}\text{C}$ ), то большая часть образовавшихся капель практически одновременно замерзает, что порождает очень высокую

концентрацию мельчайших ледяных частиц. В 1970-х гг. Хеймсфилд и Нолленберг подтвердили [51], что в перистых облаках преобладают кристаллы столбчатых форм, часто объединенные в розетки.

В кристаллических облаках наблюдаются гало, появляющиеся благодаря преломлению и отражению света ледяными кристаллами перистых, перисто-слоистых или перисто-кучевых облаков. Их наблюдение косвенно подтверждает тот факт, что ОВЯ, как правило, состоят из гексагональных ледяных частиц. Однако следует иметь в виду, что гало наблюдаются при определённых условиях: в закат или рассвет и при отсутствии низкой облачности. При этом его вид определяется размерами и ориентацией ледяных частиц в облаках. Например, окрашенное гало является следствием преломления света ориентированными кристаллами, а бесцветное – следствием отражения света на их гранях [52, 53]. Другие широко известные виды гало, такие, как ложные солнца и световые столбы, также связывают с горизонтальной ориентацией ледяных кристаллов в облаках [54–56]. Некоторые учёные (например, [42]) предполагают, что горизонтальная пространственная ориентация естественна для ледяных кристаллов. Такое ориентирование частиц в облаках приводит к аномально высоким значениям коэффициента обратного рассеяния при малых значениях оптической толщи, вследствие чего такие облака получили название зеркальных [57–59]. Это явление наблюдается весьма часто, как в наземных, так и в спутниковых исследованиях [14, 21, 29, 42, 60–62].

### **1.3 Образование и эволюция конденсационных следов самолётов**

Исследования влияния авиации на атмосферные процессы были инициированы в начале 1970-х годов прошлого столетия первыми оценками возможного влияния полётов сверхзвуковых пассажирских самолётов на озоновый слой [63, 64]. Перистые облака, сформировавшиеся из конденсационных следов самолётов, способствуют антропогенному изменению климата. Время существования таких облаков определяется окружающими



метеорологическими условиями. Всемирная метеорологическая организация (World Meteorological Organization, WMO) различает коротко- (до 10 минут) и долгоживущие (более 10 минут) самолётные следы. При этом вторая группа следов получила название Cirrus Homogenitus и является единственным искусственным типом ледяных облаков [23]. В зависимости от того, сохраняют такие аэрозольные образования свою линейную форму или нет, их называют устойчивыми самолётными следами и перистыми облаками, сформировавшимися из самолётных следов соответственно, объединяя оба вида общим названием облаков самолётного происхождения (ОСП) [24]. Появление конденсационного следа за самолётом наблюдалось ещё во времена I мировой войны 1914—1918 гг. В 1915 г. появились первые описания таких следов, а в 1926 г. Пеплер наблюдал яркое гало в следе, образовавшемся за самолётом на высоте 10 км при  $-50^{\circ}\text{C}$ , что указывало на кристаллическое его строение [65]. Работы Вейкмана [66], непосредственно изучавшего микроструктуру самолётных следов, показали, что примерно на протяжении первых 100 м следы состоят из капель, а далее – из кристаллов.

Долгоживущие конденсационные следы дрейфуют под действием ветра, который часто наблюдается на высотах полётов самолётов. Визуально отличить перистые облака неправильной формы, образовавшиеся из самолётного следа, от естественных облаков, затрудняющих их наблюдение, нелегко. Размеры перистых облаков, инициированных конденсационными следами, связаны с плохо изученными морфологическими признаками и не изучались систематически, но, вероятно, сильно различаются [24]. В северных средних широтах отдельные области пересыщения льда могут иметь длительность существования в несколько дней [67] и горизонтальную протяжённость более тысячи километров [68], но такие случаи редки, а средние значения значительно ниже. Толщина пересыщенного льдом слоя оценивается в диапазоне от 300 до 1300 м на основе скорректированных данных радиозондового зондирования [69–71], часто включающих множество тонких (толщиной в несколько сотен метров) слоёв.

Выхлопные газы, образующиеся при сжигании топливовоздушной смеси при высоких температуре и давлении в турбореактивных реактивных двигателях, содержат твёрдые частицы (рисунок 1.1). В свободно расширяющихся и охлаждающихся струях (режим струи) присутствуют частицы сажи и водяного аэрозоля, образующихся в выхлопных газах. Когда турбулентное перемешивание (изображено стрелками) и связанное с ним охлаждение приводят к пересыщению струи над жидкой водой, частицы струи превращаются в капли воды (показаны серым цветом), которые замерзают и быстро растут, поглощая водяной пар и образуя видимый конденсационный след. Это происходит, когда температура окружающей среды падает ниже порогового значения. В богатых сажей выхлопах большинство капель содержат включения сажи. Дросталы, замёрзшие водяные капли с ограниченными поверхностями, а также гексагональные призмы и столбики, которые могут образоваться из них, могут дать реалистичное представление о мелких ледяных кристаллах в “свежих” конденсационных следах, но данных непосредственных измерений не имеется [24].



Рисунок 1.1 – Эволюция самолётного следа [24]

Струи от нескольких авиационных двигателей смешиваются с двумя вихрями от концов самолётных крыльев, образуя неоднородный след. Дальнейшее развитие кристаллов льда во многом зависит от гидродинамических процессов (вихревой режим). Нисходящее движение вихревой пары нагревает воздух и вызывает осаждение нижней части потока.

Малая доля конденсационного следа высвобождается из струй, оставшихся на высоте полёта, и усиливается отводом воздуха из нижнего слоя. Кристаллы льда, присутствующие в верхнем слое, продолжают расти при поглощении захваченного льдом пересыщенного окружающего водяного пара. Через несколько минут после выброса организованная структура потока разрушается и смешивается с окружающим воздухом (режим диссипации) [24].

Выхлопные газы, образующиеся при сжигании топливно-воздушной смеси при высокой температуре и давлении в турбовентиляторном реактивном двигателе, содержат газовую и твёрдую компоненты. В свободно расширяющейся и охлаждающейся струе (реактивный режим) содержатся частицы сажи и водного аэрозоля, образующиеся в выхлопе, вместе с вовлечёнными частицами аэрозоля из окружающей среды. Когда турбулентное перемешивание и связанное с этим охлаждение приводит к пересыщению струи над жидкой водой, частицы выхлопных газов превращаются в капли воды, которые замерзают и быстро растут при поглощении водяного пара, образуя видимый след. Это происходит, когда температура окружающей среды падает ниже пороговой. В выхлопах, богатых сажой, большинство капель содержат её включения. Замороженные капли воды с гранёными поверхностями и гексагональные призмы и столбики, вероятно, развивающиеся из них, могут обеспечить реалистичное представление мелких ледяных кристаллов в «свежих» конденсационных следах, но доступных данных наблюдений их формы не найдено [24].

По мере того, как происходит смешивание конденсационных следов с окружающим воздухом и связанное с этим их охлаждение, аэрозольные частицы окружающей среды подвергаются воздействию влажного и более тёплого воздуха следа. Перед образованием ледяных кристаллов из газовых выбросов образуются мелкие частицы воды. Такие частицы делятся на более крупные моды, которые образуются на ионизированных молекулах [72, 73], и электрически нейтральные моды, слишком малые, чтобы вносить существенный вклад в формирование льда. При сгорании топлива образуются

конденсирующиеся пары, включая водяной пар, серную и азотную кислоты, а также малолетучие углеводороды. Серная кислота образуется в результате окисления выделяемых оксидов серы и обладает высокой растворимостью в воде. Азотная кислота образуется путём окисления выделяющихся оксидов азота и поглощается только достаточно разбавленными водными комплексами [24].

#### **1.4 Влияние облаков верхнего яруса на перенос радиации в атмосфере**

Если ледяные кристаллы имеют плоскопараллельные грани, горизонтальная их ориентация создаёт очень сильное зеркальное отражение, увеличивающее альbedo облаков на 40% по сравнению со случайно ориентированными кристаллами [48]. Поэтому это явление оказывает существенное влияние на региональное и глобальное радиационное воздействие кристаллических облаков. Оно также влияет на результаты измерений [74], приводя к искажениям при изучении оптических свойств облаков [75]. Более того, ориентация кристаллов влияет на скорость оседания [76, 77], которая, в свою очередь, определяет длительность существования и устойчивость облаков в атмосферных моделях [78]. Таким образом, пространственно-временное распределение горизонтально ориентированных кристаллов, термодинамические условия, определяющие их ориентацию, а также взаимосвязи между ориентированными кристаллами и крупномасштабными атмосферными процессами требуют изучения.

В тропиках ориентированные кристаллы льда чаще наблюдаются в районах, где происходит конвекция, а в средних широтах реже наблюдаются в областях, где преобладают сильные горизонтальные ветры. Вместе с тем, синоптические эффекты являются вторичными, а в первую очередь ориентирование кристаллов определяется температурой. Ориентированные кристаллы в основном отсутствуют в кристаллических облаках при

температуре холоднее  $-30^{\circ}\text{C}$  и очень часто наблюдаются в них при более высокой температуре [30].

Изменение облаками самолётно происхождения глобальной облачности создаёт дисбаланс между приходящей солнечной радиацией и уходящей от земной поверхности и атмосферы, что приводит к радиационному воздействию на климат, которое формирует тенденцию изменения распределения температуры в нижней атмосфере. Возможное широкомасштабное воздействие самолётных следов на климат получило признание несколько десятилетий назад [79, 80]. До 1990 г. количественная интерпретация была затруднена отсутствием знаний свойств ОСП, процессов, участвующих в их формировании, а также инструментов для их наблюдения и моделирования. В 1999 г. специальный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) подвёл итоги и оценил прогресс, достигнутый в изучении воздействия авиации на климат [81]. В то время, как физические характеристики стойких следов стали активно изучаться, данные наблюдений за ОСП были и остаются очень редкими, так как их трудно визуально отличить от встречающихся в природе кристаллических ОВЯ из-за неправильной формы, особенно если их происхождение и эволюция не известны [82].

Сложившаяся научная неопределённость ограничивала прогнозы воздействия авиации на климат в целом и мешала выработке вариантов его учёта в моделях. После публикации отчёта климатическое моделирование показало, что радиационное воздействие перистых облаков, сформировавшихся из самолётных следов, значительно превышает таковое у устойчивых следов [83], делая первые наиболее важной частью ОСП и наделяя их наиболее существенным вкладом в радиационное воздействие, связанное с авиацией. Тем не менее, все ещё существуют пробелы в знаниях о преобразовании самолётных следов в перистые облака и оптических свойств, определяющих их воздействие на излучение и чувствительность климатической системы.

Ключевое отличие перистых облаков, образовавшихся из следов

самолётов, от естественных – стадия формирования, в которой выбросы реактивных двигателей образуют большое количество мелких кристаллов льда [82, 84, 85], что определяет различия в эволюции и радиационном воздействии. Понимание процессов, происходящих при формировании и распространении ОВЯ естественного и антропогенного происхождения в атмосфере, является ключевым фактором при определении влияния метеорологических условий и микрофизических свойств конденсационных следов на радиационное воздействие антропогенных облаков.

По современным оценкам, вклад авиации в общее антропогенное воздействие на климат составляет 3–8% [23, 41] (рисунок 1.2). Наблюдения в 1971–1995 гг. показали [22], что частота появления перистых облаков в северных океанах и США значительно увеличилась вследствие возросшей интенсивности авиационного трафика. К 2050 г. прогнозировался 5% ежегодный рост авиатрафика [22, 24], что должно было привести к почти двукратному росту относительно 2015 г. [86]. Несмотря на снижение плотности полётов гражданских самолётов, вызванное повсеместным введением ограничительных мер на фоне пандемии коронавирусной инфекции, начиная с осени 2019 г., важность авиации в жизни современного социума трудно переоценить, а потому весьма ожидаемо, что плотность полётов восстановится после нормализации эпидемиологической обстановки в мире.

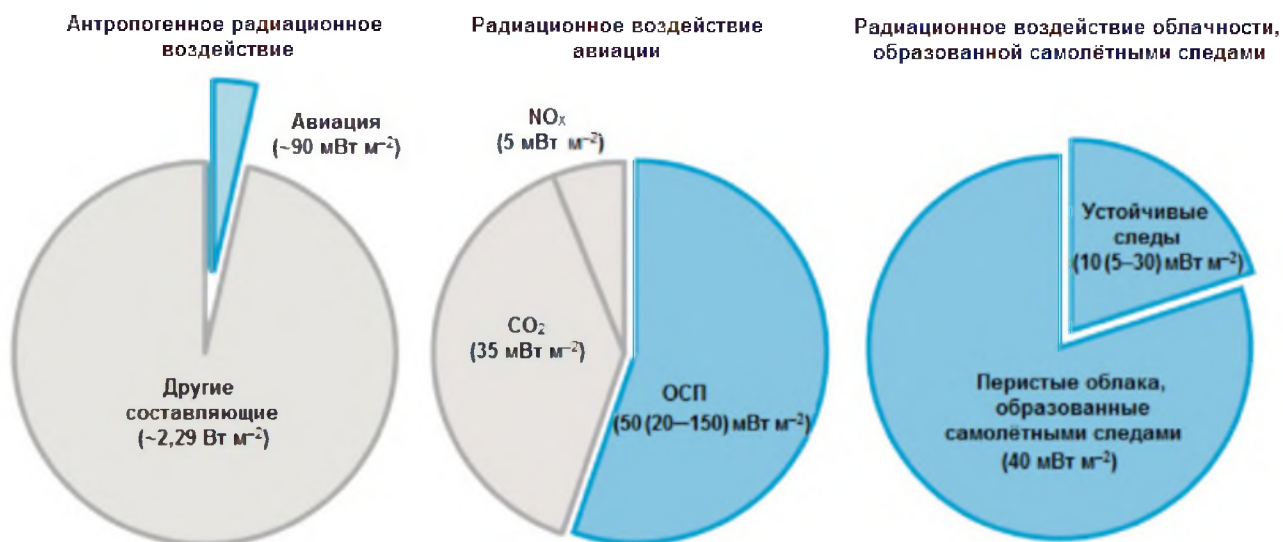


Рисунок 1.2 – Компоненты радиационного воздействия авиации на климат [23]

Как естественные перистые облака, так и устойчивые конденсационные следы самолётов вместе с образовавшимися из них перистыми облаками представляют собой ОВЯ, состоящие из ледяных кристаллов, образовавшихся в областях пересыщения льда [22]. Оно является следствием достаточно холодных и влажных атмосферных условий относительно условий насыщения по отношению к ледяной фазе, которые влияют на радиационные свойства, протяжённость и продолжительность существования всех типов перистых облаков и необходимы для формирования долгоживущих конденсационных следов и образующихся из них перистых облаков (таблица 1.2).

Таблица 1.2. – Характеристики конденсационных следов и образовавшихся из них перистых облаков [23]

Тип аэрозольного образования	Короткоживущий конденсационный след	Устойчивый конденсационный след	Перистое облако, образовавшееся из самолётного следа
Морфологические признаки	Имеет форму линии		Имеет произвольную форму
Метеорологические условия формирования	Не насыщен льдом	Пересыщен(о) льдом	
Длительность существования	0,1–10 мин	10 мин–10 ч	
Вертикальная толщина	100 м	100–1000 м	
Ширина	10–100 м	0,1–10 км	<100 км
Длина	0,1–10 км	0,1–10 км	<100 км
Воздействие на радиационный баланс	Незначительное	Малое	Существенное

Продолжительность существования и протяжённость областей пересыщения льда существенно зависят от метеорологической обстановки и устанавливают верхние пределы для длительности существования и протяжённости перистых облаков, образовавшихся из конденсационных следов. За пределами областей пересыщения льда в более сухом или более тёплом (ненасыщенном льдом) воздухе могут образовываться конденсационные следы, но они имеют короткое время существования и потому остаются узкими, имея небольшую площадь и практически не влияя на радиационный баланс [23].

## 1.5 Поляризационные лидарные исследования облаков верхнего яруса

Исследователями разных стран в течение нескольких десятков лет изучаются разнообразные морфологические формы облаков и их характеристики. Лазерное излучение впервые было использовано для исследований атмосферы в 1963 г. [87]. Перспективность использования лазеров для изучения атмосферных процессов и контроля качества воздуха была воспринята большим числом исследователей, и потому к концу 60-х годов XX века было проведено множество исследований, посвящённых различным аспектам лазерного зондирования атмосферы. Уже в начале 1970-х годов появились обзоры и монографии, в которых обобщались развитые в 1960-е годы методы лазерного зондирования и полученные результаты [88–91].

Хотя параметры распределений ледяных частиц в облаках по размерам и форме могут быть определены на основе забираемых проб, пространственная ориентация частиц при таких измерениях нарушается. Тем не менее, она может быть оценена при использовании эффектов, связанных с трансформацией состояния поляризации зондирующего излучения при его рассеянии на таких частицах. Измерения поляризации солнечного света, отражённого от атмосферы планеты, широко используются для исследования её состава, начиная с новаторской работы Лио 1929 г. [92, 93] об изучении физических характеристик поверхностей и атмосфер планет. Эта идея получила дальнейшее развитие в работах по поляризационному зондированию.

К 1970-м годам относится появление первых работ по лазерному зондированию с использованием поляризации света [94–97]. Интерес к этому эффекту обусловлен его чувствительностью к форме аэрозольных частиц и их ориентации в пространстве. Ван де Хюльстом [98] рассмотрены связи между матрицами рассеяния ансамблей частиц и их симметриями. На целесообразность исследования матриц рассеяния в атмосфере впервые обратил внимание Г.В. Розенберг. Под его руководством в ИФА АН СССР в 1950-х годах были проведены первые опыты по измерению элементов матриц



рассеяния с использованием прожектора. Им же было отмечено [25], что изучение угловых и спектральных зависимостей матриц рассеяния позволяет получить максимальный объём информации о микрофизических параметрах ансамбля частиц, какой только можно получить в эксперименте по рассеянию света. Техника лазерного зондирования предоставляет более широкие возможности по сравнению с прожекторной. Тем не менее, поляризационные измерения часто проводятся в предельно упрощенном варианте [26].

Одни из первых поляризационных лидарных измерений проводились в 1975 г. при исследовании аэрозольных загрязнений в г. София (Болгария) с использованием двухволнового поляризационного лидара [95]. Измерения двух первых компонент вектора-параметра Стокса использовались для оценки обводнённости частиц промышленных аэрозолей. Интенсивное развитие методики поляризационных измерений характеристик микроструктуры несферических аэрозолей началось в ИОА СО АН СССР после создания высотного лидара «Стратосфера 1» [97] и «Стратосфера-1М» [99]. С этого момента были начаты исследования кристаллических облаков по полной схеме измерений матриц обратного рассеяния [100]. Лидар отмечен в «Перечне уникальных экспериментальных установок национальной значимости» [101] и каталоге «Уникальные научные установки России», изданном в 1995 г. Организацией по экономической кооперации и сотрудничеству в Париже [102].

В 1965 г. в Центральной аэрологической обсерватории был создан лидар на базе серийного квантового генератора ОКГ-84 и с декабря 1965 г. начаты измерения коэффициентов обратного рассеяния и деполяризации лазерного излучения, рассеянного в обратном направлении туманом, дымкой, облаками и другими атмосферными образованиями при зондировании с земли (А.Б. Шупяцкий, В.И. Шляхов, В.В. Кравец, А.Е. Тяботов). С 1966 г. начались экспериментальные работы по лазерному зондированию атмосферы и подстилающей поверхности с борта самолёта-лаборатории ИЛ-18 (А.Е. Тяботов, В.И. Шляхов, А.Б. Шупяцкий). В условиях зондирования безоблачной атмосферы оказалось возможным обнаруживать зоны

температурной инверсии в радиусе нескольких километров. По мере создания более мощных лидаров и совершенствования систем регистрации стало возможным исследовать профили коэффициента рассеяния атмосферы до стратосферных высот, выявлять аэрозольные слои и определять характеристики аэрозоля при некоторых предположениях о коэффициенте преломления частиц и их функции распределения по размерам (В.М. Захаров, О.К. Костко, А.П. Тихонов, В.П. Фадина, Э.А. Чаянова) [103].

Советские учёные Л.И. Кравец, В.Н. Маринушкин и Н.Д. Смирнов (Центральная аэрологическая обсерватория, ЦАО) в 1986–1987 гг. определяли с помощью лидара высоты границ и коэффициенты ослабления и аэрозольного обратного рассеяния ОВЯ. В те же годы П.П. Аникин, А.Г. Петрушин и Т.А. Тарасова определяли характеристики рассеяния и поглощения элементарного объёма перистых облаков. При этом использовались модели микроструктуры кристаллической среды как системы ледяных гексагональных призм и ледяных сфер с некоторыми распределениями по размерам. Проводилось сопоставление результатов расчётов оптических характеристик для этих моделей и определялись возможности использования расчётов для ледяных сфер с некоторыми значениями эффективных радиусов для описания рассеяния на ледяных кристаллах [12].

Влияние микроструктуры кристаллических облаков на их оптические свойства исследуется в ИОА СО РАН (г. Томск). Известны работы И.В. Самохвалова, Б.В. Кауля, Д.Н. Ромашова, С.Н. Волкова и других сотрудников института. Показаны зависимости коэффициента ослабления кристаллических облаков [104] и структуры матрицы обратного рассеяния света от взаимной ориентации плоскости поляризации зондирующего лазерного излучения и ориентации ледяных кристаллов в облаках, а также оценивались направление преимущественной ориентации и степень ориентированности частиц в атмосферных аэрозольных слоях на основе анализа свойств МОРС [105]. При этом было сделано предположение от возможности обнаружения кристаллических частиц не водного происхождения на основе

поляризационных лидарных измерений. В частности, анализ свойств МОРС длительно (с середины июля по конец сентября 1991 г.) наблюдавшегося аэрозольного слоя позволил связать его происхождение с извержением вулкана Пинатубо [105]. Анализ [100] массива экспериментальных данных, накопленный с помощью поляризационного лидара «Стратосфера-1М» [99, 106, 107] показал, что состояние ориентированности ледяных кристаллов в облаках не является редким, а также значительно сказывается на характеристиках рассеяния света. В частности, показано, что коэффициент обратного рассеяния зависит от ориентации лидара относительно зондируемого облака. Решение задачи восстановления микроструктуры реальных ОВЯ возможно на основе сопоставления экспериментально получаемых в лидарных экспериментах МОРС таких облаков с матрицами, рассчитанными теоретически для полидисперсных ансамблей ледяных кристаллов. Попытки такого сопоставления выполнялись Б.В. Каулем, Д.Н. Ромашовым и И.В. Самохваловым [108, 109]. Среди прочего, разработана методика коррекции помехи в лидарных сигналах, вносимой многократным рассеянием, выполняемой на основе свойств симметрии МОРС и особенностей поляризационной структуры излучения, претерпевшего многократное рассеяние на несферических частицах [110]. Примечательна методика калибровки по «молекулярному реперу», позволяющей выделить аэрозольный компонент из МОРС аэрозольно-газовой смеси и оценить ошибки определения элементов матрицы по результату единичного измерения [111]. Показано [112], что использование круговой поляризации лазерного излучения при зондировании кристаллических облаков и анализ четвёртого компонента вектора-параметра Стокса предпочтительнее измерений деполяризации линейно поляризованного излучения, часто используемого при лидарных исследованиях. Преимущество определяется исключением неопределённости величины лидарной деполяризации, возникающей при наличии упорядоченной пространственной ориентации ледяных кристаллов в облаке.

Исследования атмосферы на основе поляризационного лазерного зондирования ведутся и за рубежом. В 1980-1990-х гг. Такано и Лю изучали свет, рассеянный случайно ориентированными гексагональными пластинками и столбиками, а также неправильными ледяными частицами [113]. Эти исследования проводились для объяснения измеренной линейной поляризации солнечного света, отражённого от оптически толстых перистых облаков. В 1999 г. Шефер с коллегами описали эксперименты по измерению поляризации солнечного света, отражённого от перистых облаков, проведённые с помощью спутникового прибора POLDER [114]. В 2002 г. Лю и Такано предложили [115] теорию для расчета переноса солнечной радиации с учётом поляризации излучения через облако, представленное ансамблями случайно- и горизонтально ориентированных кристаллов льда. Интерпретация поляризационных измерений показала, что поляризация рассеянного солнечного света может быть использована для того, чтобы различить сферические капли воды и несферические кристаллы льда. Это необходимо для получения информации о форме кристаллов льда и определения свойств их ориентации. В 2009 г. Лаккис с коллегами исследовали [116] свойства перистых облаков в средних широтах и показали, что верхние части таких облаков близки к тропопаузе. Среди прочих выводов, заключено, что верхушки перистых облаков можно рассматривать как индикатор тропопаузы, а также замечено, что свойства таких облаков (например, высота, толщина и др.) существенным образом зависят от их географического положения.

Горизонтально ориентированные ледяные пластины в облаках часто определяются лидарами, направленными в зенит или надир (например, из космоса). Наличие пластинок с такой ориентацией приводит к формированию сильного обратного рассеяния, низкой деполяризации и зеркальному отражению зондирующего излучения [117, 118]. Лидар на американско-французском исследовательском спутнике CALIPSO изначально был ориентирован в надир, но затем направление зондирования было изменено. Наклон был вызван тем, что отражение лазерного излучения от

ориентированных кристаллических частиц в облаках «ослепляет» приёмник лидара, подавляя полезный сигнал [119]. Информацию об ориентации кристаллов льда в облаках можно получить, используя эффекты, связанные с трансформацией состояния поляризации зондирующего излучения при его взаимодействии с исследуемой средой. Однако реализация таких измерений затруднена вследствие сложности конструкции, оборудования и, как правило, трудности обработки экспериментальных данных [120].

Хейман с соавторами использовали [121] лидар для измерения блочно-диагональной МОРС, используя векторный формализм матрицы Мюллера. Для этого они модифицировали лидар с высоким спектральным разрешением (ЛВСР; англ. «High Spectral Resolution Lidar», HSRL) Национального центра атмосферных исследований (National Center for Atmospheric Research, NCAR), расположенного в Боулдере (штат Колорадо, США). Для измерения матрицы обратного рассеяния использовалась вращающаяся четвертьволновая пластинка. На рисунке 1.3 приведена упрощённая схема ЛВСР. Излучение лазера изначально поляризовано вертикально (буква «В» на рисунке); использование вращающейся четвертьволновой пластинки позволяет изменять по определённому закону поляризацию посылаемого в атмосферу и принимаемого излучения. Дополнительные оптические элементы, такие, как поворотные зеркала и поляризаторы, на рисунке не приведены.

В качестве примера приводятся результаты эксперимента 16 июля 2012 г. (14:00 местного времени). Лидар был наклонён от зенита на  $20^\circ$ , эксперимент проводился после сильного ливня. Вертикальный профиль элементов МОРС показан на рисунке 1.4. Выше 2,5 км расположено облако, недиагональные элементы МОРС которого близки к нулю. В то же время, ниже 2,5 км, где наблюдался дождь, недиагональные элементы МОРС отличались от нуля. Этот результат авторы объясняют рассеянием излучения на крупных дождевых каплях, которые приобретают форму сплюснутых сфероидов, испытывая лобовое сопротивление воздуха при падении под действием силы тяжести (как, например, описано в работе [122]). Профили элементов МОРС на

рисунке 1.4 показывают, что ЛВСП позволяет определять параметры преимущественно- и случайно ориентированных рассеивающих частиц.



Рисунок 1.3 – Схема приёмопередатчика лидара с высоким спектральным разрешением (Национальный центр атмосферных исследований, США) [121]

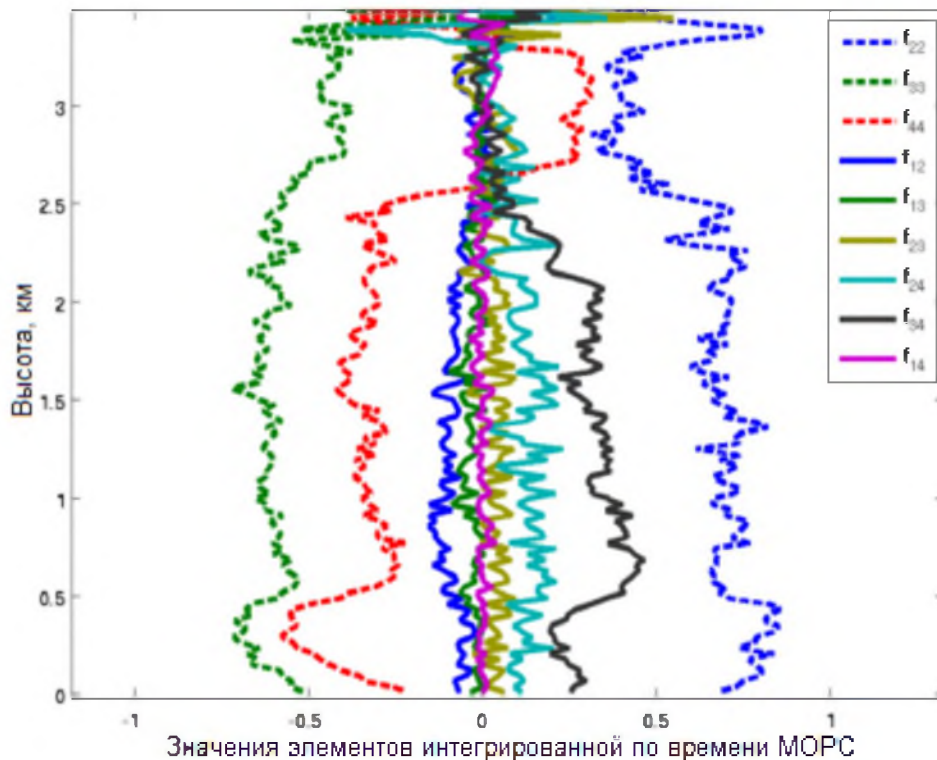


Рисунок 1.4 – Нормированные измеренные элементы МОРС сильного дождя с облаком смешанной фазы над ним; диагональные элементы обозначены пунктирными линиями, а недиагональные – сплошными [121]

Итальянские учёные Дель Гуаста и коллеги [61] использовали поляризационный лидар для получения полного вектора Стокса обратно рассеянного излучения и других его характеристик. Общая схема этого лидара приведена на рисунке 1.5. Для исследования наличия анизотропной рассеивающей среды использовалась деполяризация циркулярно- и линейно поляризованного излучения. Рассеяние изотропными частицами показывает простую связь между линейной и циркулярной деполяризациями – соотношение, которое было подтверждено теоретически и экспериментально. Отклонения от этих соотношений, возможные в присутствии анизотропных рассеивающих частиц (таких, как горизонтально ориентированные ледяные пластинки при наблюдении их наклонным лидаром), изучались как численно, так и экспериментально.

Использовался малый автоматический поляризационный лидар, разработанный в Институте прикладной физики (Флоренция, Италия). В качестве источника излучения использовался Nd:YAG лазер. Передающая система лидара была оснащена четвертьволновой пластинкой нулевого порядка, которая могла поворачиваться на  $0^\circ$  или  $45^\circ$  вращающимся электромагнитом под управлением компьютера. Таким образом, в атмосферу направлялось излучение с линейной либо циркулярной поляризацией. Для проведения полного анализа полученного поляризованного света использовался оптический элемент, состоящий из трёх сегнетоэлектрических четвертьволновых фазовращателей перед анализатором поляризации, как показано на рисунке 1.5.

Для уменьшения перекрёстных помех между двумя поляризационными каналами использовался анализатор, состоящий из трёх поляризационных кубических светоделителей. Их наличие существенным образом ограничивало применимость такого лидара вследствие значительных энергетических потерь. Применимость описанного лидара зависит от частоты появления горизонтально ориентированных кристаллов льда идеальной геометрии в атмосфере.

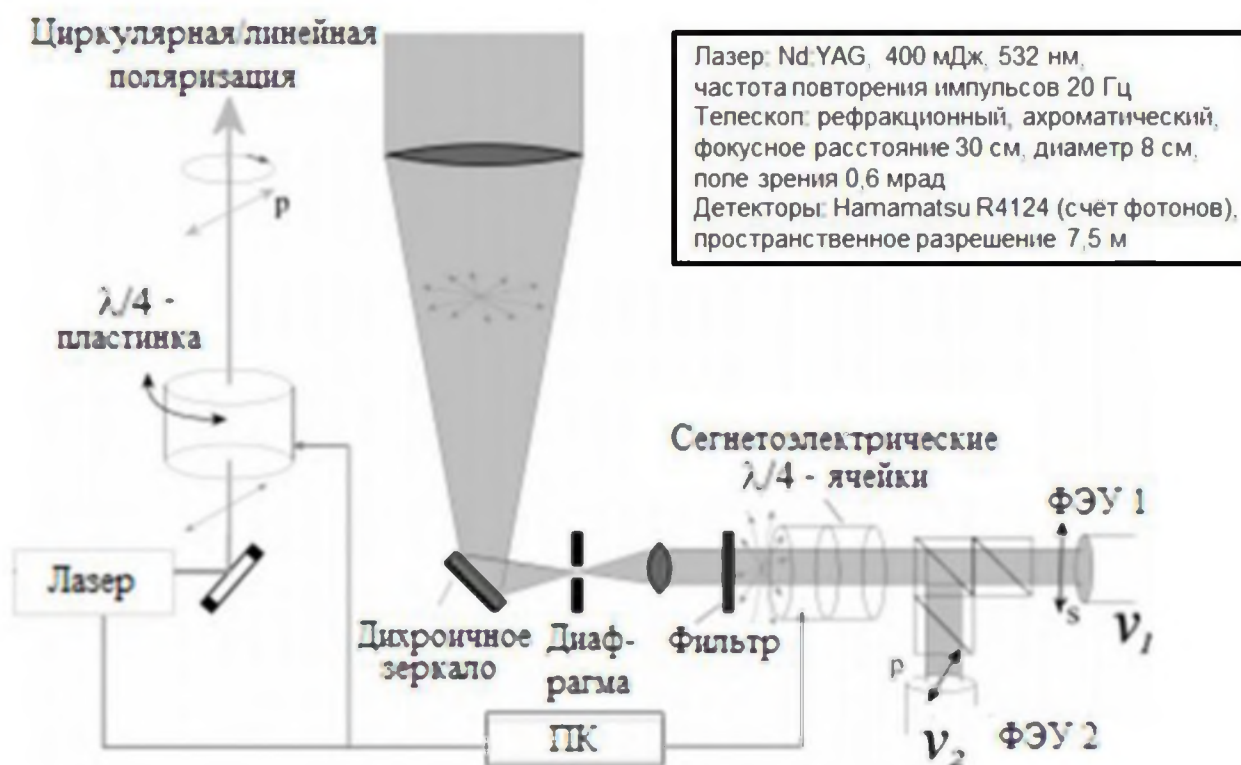


Рисунок 1.5 – Общая схема поляризационного лидара Института прикладной физики Национального совета по научно-исследовательской работе Италии [61]

По результатам первых экспериментов, проведенных на описанном лидаре с зенитным углом  $30^\circ$  и вертикальной линейной поляризацией излучения лазера, лишь несколько наблюдений облаков показали доказательства анизотропии. Эти выводы согласуются с результатами наблюдений прибором POLDER, согласно которым типичная доля ориентированных пластинок в облаках составляет  $10^{-3}$ – $10^{-2}$  [114, 123]. Кроме того, ориентированные пластинки почти идеальной геометрии составляют, по мнению авторов [61], лишь малую часть ориентированных пластинок. По этим причинам заключено, что использованная методика исследований менее чувствительна при определении наличия небольших количеств ориентированных пластинок, чем в случае применения зенитно-направленного лидара.

В 2013 г. сотрудниками ИОА СО РАН и НИ ТГУ был разработан и совместно с учёными Республики Корея построен поляризационный лидар Ханбатского национального университета (Hanbat National University) [124].



На рисунке 1.6 приведена его блок-схема. В лидаре была реализована идея определения МОРС на основе измерений только девяти (рисунок 1.7) интенсивностей рассеянного назад излучения вместо шестнадцати, необходимых для получения полной МОРС. Те элементы матрицы, для нахождения которых измерения не выполняются, определяются на основе свойств симметрии МОРС.

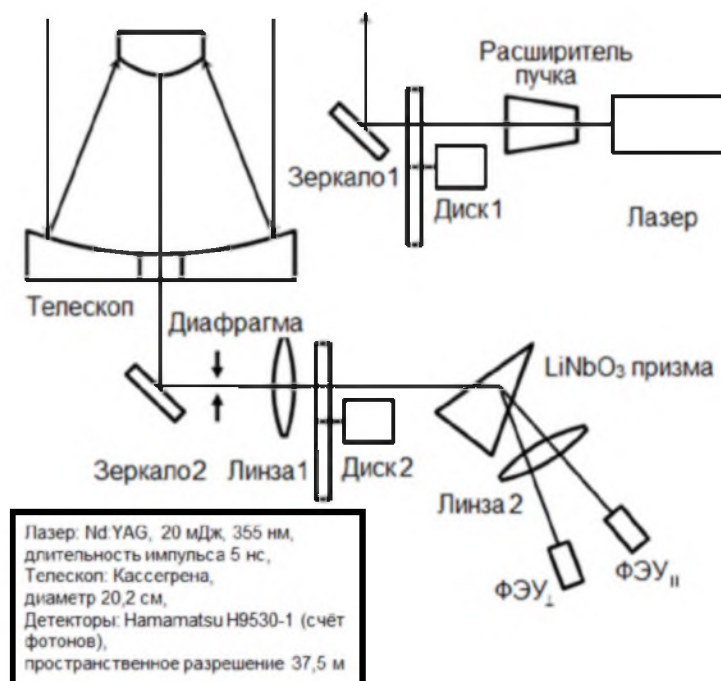


Рисунок 1.6 – Блок-схема поляризационного лидара Ханбатского Национального университета (Респ. Корея) [125]

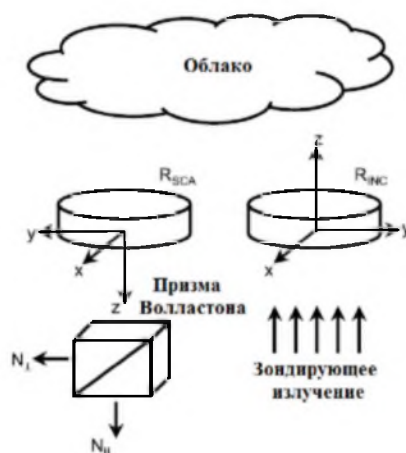


Рисунок 1.7 – Принципиальная схема поляризационных измерений:  $R_{mc}$  – фазовая пластинка передатчика,  $R_{sca}$  – фазовая пластинка приемника,  $N_{\parallel}$  и  $N_{\perp}$  – регистрируемые сигналы со взаимно ортогональной поляризацией [125]

В качестве примера рассмотрим измерения от 1–2 июня 2014 г. На рисунке 1.8 показан вертикальный профиль временной динамики отношения рассеяния. В начале эксперимента давление, влажность и температура на поверхности Земли были равны 1009,7 гПа, 78% и 24°C, а в конце – 1009,4 гПа, 79% и 22,2°C соответственно.

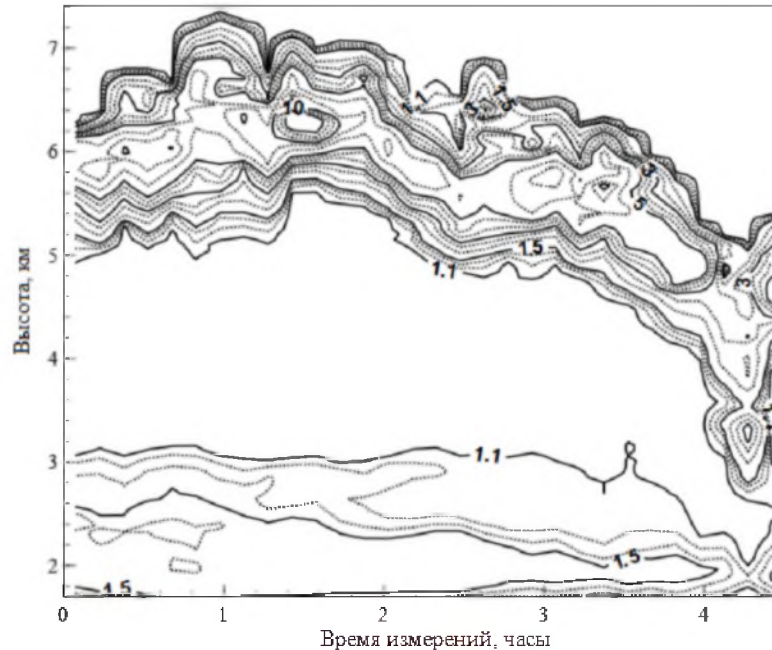


Рисунок 1.8 – Вертикальный профиль временной динамики отношения рассеяния (1–2 июня 2014 г., 20:05–00:50 по стандартному корейскому времени (KST)) [125]

Результаты измерений на высотах от 1,5 до 9 км показывают, что вклад частиц несферической формы в рассеяние преобладал во всём интервале высот. Кроме того, на высотах до ~3 км и выше ~4 км отмечается наличие ассиметричных частиц.

### Основные выводы по главе 1

В первой главе описаны условия и особенности формирования и строения облаков верхнего яруса естественного и антропогенного происхождения. Для природных ОВЯ приведена современная морфологическая классификация, а для антропогенных описана эволюция в течение времени существования с момента выхода выхлопных газов из авиационного двигателя

в атмосферу. Представлен обзор экспериментальных работ по изучению атмосферы оптическими методами. Особое внимание уделено поляризационным лидарным системам, используемым для изучения ОВЯ. Примечательно, что ни один из известных в мире поляризационных лидаров не позволяет получать полные матрицы обратного рассеяния света облаков непосредственными измерениями. В тех публикациях, где приводятся МОРС, как правило, по данным эксперимента получены только 9 её элементов, а остальные определяются на основе свойств симметрии МОРС с использованием математических соотношений между её элементами. Последнее справедливо только при выполнении предположения, что лидарный сигнал от облака сформирован вследствие однократного рассеяния.

## **Глава 2 ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЛАКОВ ВЕРХНЕГО ЯРУСА**

ОВЯ почти полностью состоят из ледяных частиц. Оптические свойства таких облаков определяются параметрами их микроструктуры, такими как форма, размеры и пространственная ориентация ледяных частиц в них. Классические методы локальных измерений в большинстве случаев позволяют получить ограниченный набор данных об атмосферных частицах (форма, масса, электрический заряд), но при заборе проб атмосферного воздуха ориентация несферических частиц нарушается [107], а потому контактных методов измерения ориентации ледяных кристаллов в облаках не существует.

В исследованиях атмосферы наиболее информативны лидарные методы вследствие широкого многообразия эффектов, возникающих при взаимодействии оптического излучения со средой [126]. Использование лазерного излучения позволяет получать информацию об исследуемой среде с большой оперативностью и высоким пространственным разрешением, в том числе, определять предельно малые концентрации газов и изучать особенности микроструктуры аэрозоля. Дистанционная оценка ориентации несферических аэрозольных частиц в облаках возможна при использовании эффектов, связанных с трансформацией состояния поляризации зондирующего излучения при его рассеянии на таких частицах. Эта возможность реализована в методе ПЛЗ [26, 127], основанном на экспериментальном получении и анализе МОРС облаков и анализе свойств их симметрии. Этот метод является дистанционным, бесконтактным и оперативным. Определяющим элементом реализации потенциальных возможностей лазерного зондирования являются характеристики источника когерентного оптического излучения (лазера).

### **2.1 Метод поляризационного лазерного зондирования атмосферы**

Суть метода ПЛЗ заключается в следующем: в атмосферу посылается узконаправленный пучок лазерного излучения с длительностью импульса в

несколько наносекунд. Обратное рассеянное в атмосфере излучение принимается оптической системой и направляется на фотодетектор, где преобразуется в электрический сигнал. Затем он оцифровывается и обрабатывается с помощью ЭВМ. При этом используются 4 состояния поляризации зондирующего излучения, для каждого из которых определяется вектор Стокса обратного рассеянного излучения. В результате получают полные МОРС облаков. Метод ПЛЗ впервые был реализован в лидаре «Стратосфера 1М», сконструированном и изготовленном в ИОА СО АН СССР совместно с СКБ НП «Оптика» СО АН СССР [99]. С помощью этого лидара исследовались высотные распределения характеристик атмосферного аэрозоля над Томском [128]. Однако уровень техники регистрации лидарных сигналов, их обработки и отображения экспериментальных данных был недостаточен для определения вертикальных профилей МОРС. В 1989 г. стало возможным проводить эксперименты по полной схеме поляризационного зондирования, а именно определять в измерениях все 16 элементов МОРС [100, 105, 106].

### **2.1.1 Уравнение лазерного зондирования в векторной форме**

Кристаллические облака представляют собой оптически анизотропную среду. При распространении света в такой среде ослабление и изменение состояния поляризации его прямой и рассеянной долей зависят от направления распространения и состояния поляризации зондирующего (падающего на среду) излучения. Уравнение лазерного зондирования (УЛЗ) в скалярной форме, описывающее функциональную взаимосвязь между атмосферными и аппаратными параметрами [90, 126, 129], этого обстоятельства не учитывает, поскольку предполагает, что характеристики рассеивающей среды описываются скалярными величинами – коэффициентами рассеяния и ослабления, а также индикатрисой рассеяния. Б.В. Кауль показал [26], что для кристаллических облаков замена коэффициента обратного рассеяния на одноименную матрицу является достаточно обоснованным приёмом для перехода к векторной форме УЛЗ:

$$P(z)\mathbf{s}(z) = \frac{1}{2}cW_0 \frac{A}{z^2} G(z) \mathbf{M}_\pi(z) \mathbf{s}_0 \exp \left\{ -2 \int_0^{z_0} \varepsilon(z', \theta, \varphi) dz' \right\},$$

где  $P(z)$  и  $\mathbf{s}(z)$  – мощность и нормированный вектор-параметр Стокса излучения, поступающего на вход приёмной системы лидара из рассеивающего объёма, находящегося на трассе зондирования на расстоянии  $z$  от источника соответственно;  $c$  – скорость света в среде;  $W_0 = P_0 \Delta t$  – энергия импульса передатчика лидара ( $P_0$  и  $\Delta t$  – мощность и длительность импульса лазера);  $A$  – эффективная площадь приёмной антенны;  $G(z)$  – геометрический фактор (при зондировании ОВЯ обычно  $G(z) = 1$ );  $\mathbf{M}_\pi(z)$  – нормированная МОРС рассеивающего объёма;  $\mathbf{s}_0$  – нормированный вектор-параметр Стокса излучения источника;  $\varepsilon(z', \theta, \varphi)$  – коэффициент ослабления;  $\theta$  и  $\varphi$  – полярный и азимутальный углы соответственно. Если направление зондирования фиксировано, то учёт ослабления вдоль трассы ничем не отличается от скалярного случая. Следует учитывать, что УЛЗ в таком виде не учитывает зависимость ослабления излучения от направления распространения по отношению к осям, характеризующим анизотропию среды. Также исключается из рассмотрения возможное изменение поляризации прямого и рассеянного излучения по мере прохождения им участка трассы зондирования, расположенного в анизотропной среде.

### 2.1.2 Приборный вектор

Метод ПЛЗ основан на решении системы 16-ти УЛЗ. При этом предполагается, что оптическая толщина исследуемых облаков мала, поэтому для описания свойств их взаимодействия с оптическим излучением достаточно применения первого приближения теории многократного рассеяния. Удобным и компактным способом описания поляризационных измерений является описание действия поляризационных приборов посредством матричных операторов. Джонс ввёл матричные операторы для описания преобразования вектора напряжённости поля [130–133]. Согласно методу Джонса, комплексные

амплитуды падающей на прибор и прошедшей через него волны связаны матричным соотношением

$$\begin{pmatrix} E'_x \\ E'_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix},$$

где элементы матрицы  $\mathbf{D}$  – действительные или комплексные числа. Их размерность  $2 \times 2$  и очевидность для некоторых простых приборов определяет удобство применения этого метода. Однако, он пригоден только для описания действия прибора на полностью поляризованный свет. Если же свет поляризован частично, то следует использовать метод Мюллера [134], согласно которому действие поляризационного элемента описывается линейным преобразованием

$$\mathbf{S}' = \mathbf{M}\mathbf{S}, \quad (2.1)$$

где  $\mathbf{S}$  и  $\mathbf{S}'$  – векторы Стокса излучения до- и после взаимодействия с рассеивающим объёмом соответственно, а  $\mathbf{M}$  – матрица Мюллера поляризационного элемента размерностью  $4 \times 4$ , элементы которой – действительные числа [26]. Если световой пучок встречает на пути своего распространения несколько приборов, то их совокупное действие описывается произведением их матричных операторов:

$$\mathbf{S}' = \mathbf{M}_n \times \mathbf{M}_{n-1} \dots \mathbf{M}_1 \mathbf{S},$$

причём нумерация операторов соответствует очередности взаимодействия пучка с соответствующими приборами, начиная с 1.

Процедура измерения параметров Стокса представляет собой измерение интенсивности излучения при различных комбинациях поляризационных приборов. Интенсивность излучения, прошедшего комбинацию приборов, описывается формулой

$$I' = M_{11}I + M_{12}Q + M_{13}U + M_{14}V,$$

где коэффициенты  $M_{ij}$  являются элементами первой строки матрицы, полученной перемножением матричных операторов отдельных приборов. Определим эту строку как вектор-строку

$$\mathbf{G} = (M_{11}, M_{12}, M_{13}, M_{14})$$

и будем называть вектор  $\mathbf{G}$  приборным вектором. Произведение вектора  $\mathbf{G}$  на вектор-столбец Стокса, очевидно, даёт  $I' = \mathbf{GS}$ . Отметим, что для определения всех компонентов вектора Стокса необходимо измерить как минимум четыре интенсивности. Полный цикл измерений МОРС предусматривает измерения параметров Стокса при четырёх состояниях поляризации лазерного излучения – процедура таких измерений и обработки их результатов описана в п.2.3. Отметим, что заглавные буквы в векторах Стокса излучения описывают вектор, ненормированный на первый свой компонент.

## **2.2 Высотный матричный поляризационный лидар Томского государственного университета**

Логическим развитием [135, 136] лидара «Стратосфера 1М» является высотный матричный поляризационный лидар (ВМПЛ) НИ ТГУ. Его блок-схема приведена на рисунке 2.1. Эксперименты по зондированию ОВЯ регулярно выполняются на нём с 2009 г. Лидар расположен в Томске и ориентирован вертикально, в зенитном направлении. В качестве источника зондирующего излучения используется вторая гармоника Nd:YAG-лазера фирмы LOTIS ТП с длиной волны 532 нм, частотой импульсов 10 Гц и энергией в импульсе до 400 мДж. Излучение проходит призму Глана и коллиматор (уменьшающий расходимость пучка) и посылается в атмосферу в направлении, близком к зенитному. Приёмной антенной служит зеркальный объектив Кассегрена с диаметром 0,5 м и эффективным фокусным расстоянием 5 м. В его фокальной плоскости установлена диафрагма, определяющая поле зрения приёмной системы, затем – собирающая линза, передний фокус которой совмещён с задним фокусом объектива. Пучок принимаемого излучения после прохождения линзы становится квазипараллельным и проходит интерференционный фильтр и призму Волластона, формирующую два пучка со взаимно ортогональными поляризациями. Они направляются на фотоэлектронные умножители (ФЭУ) Hamamatsu H5783P, работающие в



режиме счёта фотонов, сигнал с которых оцифровывается двухканальным счётчиком фотонов производства Becker & Hickl GmbH.

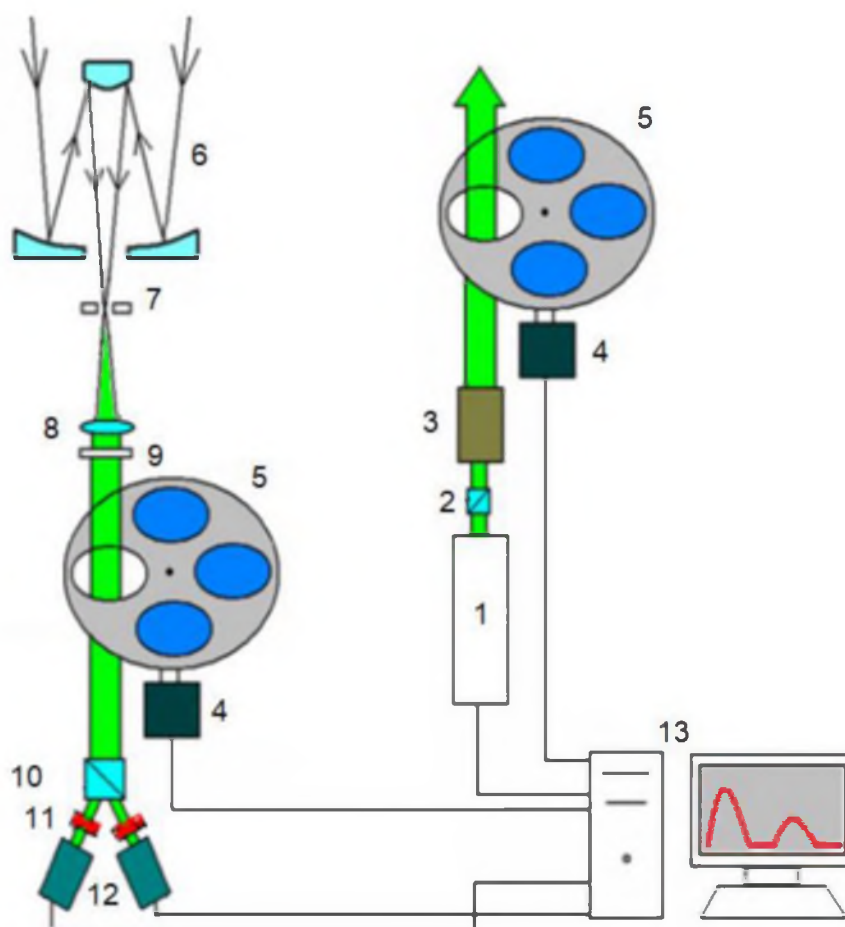


Рисунок 2.1 – Блок-схема поляризационного лидара НИ ТГУ: 1 – лазер; 2 – призма Глана; 3 – коллиматор; 4 – шаговый двигатель; 5 – узел трансформации состояния поляризации; 6 – зеркальный объектив Кассегрена; 7 – диафрагма; 8 – линза; 9 – интерференционный фильтр; 10 – призма Волластона; 11 – электрооптические затворы; 12 – фотоэлектронные умножители; 13 – аппаратура регистрации и отображения данных на основе компьютера [21]

Перед ФЭУ установлены электрооптические затворы [137], подавляющие помеху обратного рассеяния из ближней зоны лидара и устраняющие негативное влияние засветки на характеристики фотокатодов при работе лидара в дневное время с максимальной энергией зондирующих импульсов. Другие методические особенности оценки мощности лидарного сигнала от облаков в условиях влияния фоновой помехи дневного неба описаны в работах [29, 107, 111]. Для уменьшения погрешности оценки величины

лидарного сигнала в каждом временном стробе, соответствующем пространственному разрешению 37,5–150 м, ведётся накопление по 100–500 зондирующим импульсам. Основные характеристики ВМПЛ НИ ТГУ приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Основные характеристики высотного поляризационного лидара НИ ТГУ [135, 138–140]

Передающая система	
Тип лазера	YAG:Nd <sup>3+</sup> Lotis TII LS-2137U
Длина волны, нм	532
Энергия, мДж	400
Частота импульсов, Гц	10
Расходимость пучка, мрад	0,8
Расходимость пучка после коллиматора, мрад	0,28
Длительность импульса, нс	7
Приёмная система	
Тип регистрирующего устройства	Двухканальный счётчик фотонов Becker & Hickl GmbH PMS-400A
Скорость счёта, МГц	800
Минимальная ширина стробированного импульса, нс	1
Тип интерференционного фильтра	Thorlabs FL532-3
Центральная длина волны, нм	532 ± 0,6
Ширина полосы пропускания, нм	3 ± 0,6

Отличительной особенностью ВМПЛ НИ ТГУ являются блоки трансформации состояния поляризации посылаемого и принимаемого излучения, позволяющие поочередно направлять в атмосферу излучение с четырьмя состояниями поляризации и определять для каждого вектор-параметр Стокса обратно рассеянного излучения. Так в каждом приёмном канале измеряются интенсивности 16 лидарных сигналов, необходимых для определения полной МОРС облака. На рисунке 2.2 представлены вертикальные профили интенсивности лидарного сигнала для каждой комбинации состояния поляризации зондирующего излучения (описываемого вектором Стокса  $S$ ), и

приборного вектора  $\mathbf{G}$  приёмной системы лидара для обоих каналов. Приборные векторы  $\mathbf{G}$  приведены только для первого приёмного канала, о чём свидетельствует верхний индекс «А». Для второго канала они соответствуют  $\mathbf{G}^{(A)}$ , но имеют противоположные знаки у всех компонентов, исключая первый.

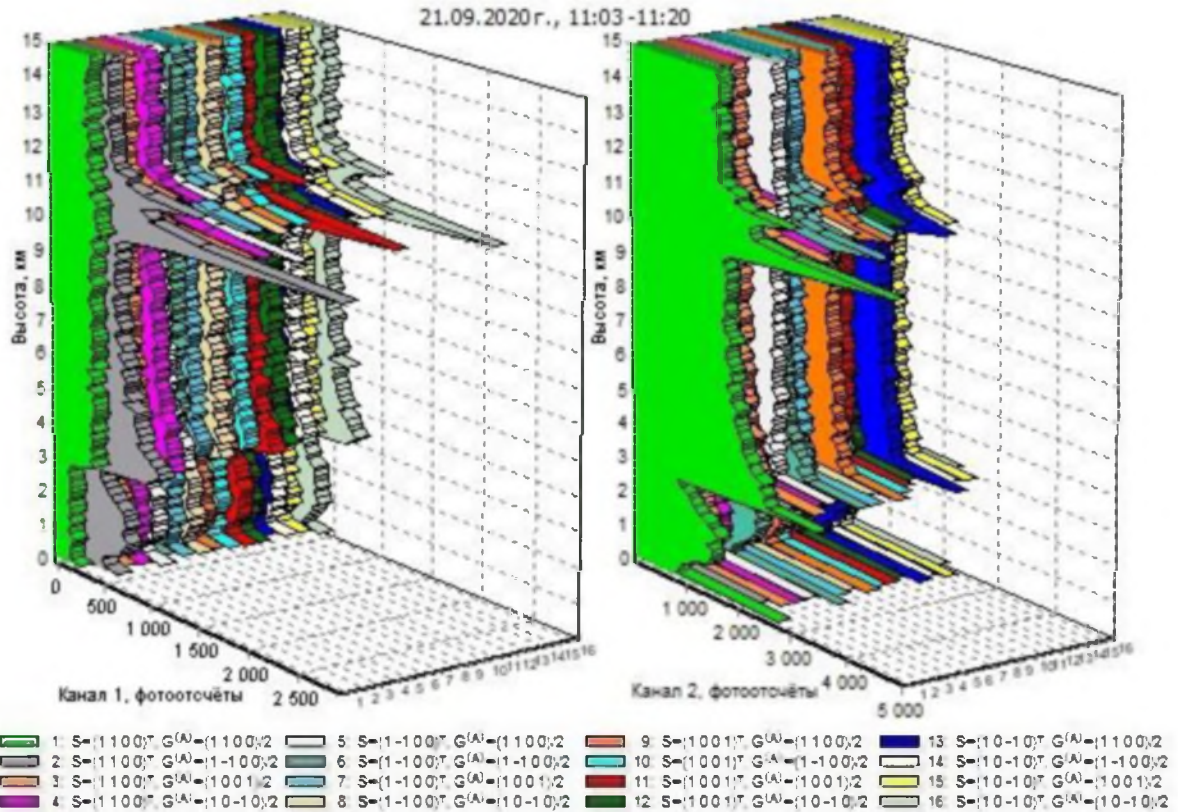


Рисунок 2.2 – Пример вертикальных профилей интенсивности лидарного сигнала, полученных для различных комбинаций состояний поляризации зондирующего и принимаемого обратно рассеянного излучения для обоих каналов приёмной системы лидара

При экспериментальном получении МОРС облаков следует учитывать, что в течение интервала времени, требуемого для получения всех её 16-ти элементов, происходит смена физических объёмов, из которых поступает рассеянное излучение. Корректное же измерение МОРС требует выполнения условия “замороженности”, то есть неизменности положения и ориентации частиц за время измерений. Строго соблюсти это условие вообще очень сложно, а применительно к схеме дистанционного зондирования практически невозможно [105]. Требуется последовательная смена состояния поляризации излучения лазерного передатчика. В то же время рассеивающие свойства

аэрозольного ансамбля хаотически меняются даже в отсутствие макроскопического переноса, а потому усреднение элементов МОРС по времени флуктуаций практически неизбежно. При лидарных исследованиях ОВЯ каждое измерение относится к иному физическому объёму вследствие ветрового переноса, а горизонтальная протяжённость суммарного объёма, охваченного измерениями, исчисляется километрами. В каждом измерении участвуют другие частицы, и количество их может различаться от измерения к измерению. По этой причине ранние исследования на лидаре НИ ТГУ (в частности, [138]) были основаны на гипотезе, предполагающей, что в генеральном ансамбле сохраняются микрофизические характеристики частиц, ответственные за поляризацию излучения, и допускались лишь вариации их концентрации.

С 2016 г. регистрация лидарных сигналов от ОВЯ ведётся в режиме параллельного накопления 16 массивов одноэлектронных импульсов, что позволяет на одном и том же временном интервале оценивать с одинаковой погрешностью интенсивность всех 16 лидарных сигналов от ОВЯ, необходимых для определения всех элементов МОРС. Во время зондирования в таком режиме происходит постоянная смена поляризационных элементов в передающей и приёмной системах лидара. Таким образом, движение исследуемых объёмов воздуха, попадающих в поле зрения телескопа, одинаковым образом влияет на измерения с каждой из используемых комбинаций поляризаций зондирующего и принимаемого излучения. Параллельный режим измерений позволяет получать массивы одноэлектронных импульсов для всех элементов МОРС, что уменьшает ошибку их определения, вызванную смещением облаков за время измерений. Кроме того, параллельное накопление сигналов позволяет непрерывно вести длительный эксперимент и затем выбирать для обработки интервалы времени, соответствующие заданным критериям.

### 2.3 Экспериментальное определение компонентов вектора-параметра Стокса принимаемого излучения и матрицы обратного рассеяния света облака

В передающей системе лидара НИ ТГУ (см. п.2.2) реализованы 4 состояния поляризации зондирующего излучения, характеризующиеся векторами Стокса  $\mathbf{s}_0^{(k)}$ :

$$\mathbf{s}_0^{(1)} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \Rightarrow \mathbf{s}^{(1)} = \begin{pmatrix} 1 \\ q^{(1)} \\ u^{(1)} \\ v^{(1)} \end{pmatrix}; \quad \mathbf{s}_0^{(2)} = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \Rightarrow \mathbf{s}^{(2)} = \begin{pmatrix} 1 \\ q^{(2)} \\ u^{(2)} \\ v^{(2)} \end{pmatrix}; \quad \mathbf{s}_0^{(3)} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \Rightarrow \mathbf{s}^{(3)} = \begin{pmatrix} 1 \\ q^{(3)} \\ u^{(3)} \\ v^{(3)} \end{pmatrix}; \quad \mathbf{s}_0^{(4)} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} \Rightarrow \mathbf{s}^{(4)} = \begin{pmatrix} 1 \\ q^{(4)} \\ u^{(4)} \\ v^{(4)} \end{pmatrix}.$$

Подставим соответствующие векторы Стокса в выражение

$$\mathbf{s}^{(k)} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{pmatrix} \times \mathbf{s}_0^{(k)},$$

где  $m_{ij}$  – элементы МОРС исследуемого объёма атмосферы, нормированной на первый её элемент:  $m_{ij} = M_{ij}/M_{11}; m_{11} \equiv 1$ . Выразим элементы МОРС через компоненты векторов Стокса принимаемого обратно рассеянного излучения. Рассмотрим такую подстановку на примере первой поляризации зондирующего излучения:

$$\begin{pmatrix} s_1^{(1)} \\ s_2^{(1)} \\ s_3^{(1)} \\ s_4^{(1)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Раскрыв матричные произведения, получим:

$$m_{i1} \times 1 + m_{i2} \times 1 + m_{i3} \times 0 + m_{i4} \times 0 = s_i^{(1)}, \text{ где } i = 1, \dots, 4,$$

или

$$m_{i1} + m_{i2} = s_i^{(1)}, \text{ где } i = 1, \dots, 4.$$

Аналогичным образом получим связь элементов МОРС с компонентами векторов Стокса принимаемого излучения для остальных трёх состояний поляризации зондирующего излучения:

$$m_{i1} - m_{i2} = s_i^{(2)}, \text{ где } i = 1, \dots, 4;$$

$$m_{i1} + m_{i4} = s_i^{(3)}, \text{ где } i = 1, \dots, 4;$$

$$m_{i1} - m_{i3} = s_i^{(4)}, \text{ где } i = 1, \dots, 4.$$

Имеем систему 16 линейных уравнений с шестнадцатью неизвестными. Выполнив алгебраические преобразования и обозначая компоненты нормированного вектора Стокса  $\mathbf{s}$  как  $(1 \ q \ u \ v)^T$ , получим:

$$m_{\pi} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{q^{(1)} + q^{(2)}}{2} & -\frac{u^{(1)} + u^{(2)}}{2} & \frac{v^{(1)} + v^{(2)}}{2} \\ \frac{q^{(1)} + q^{(2)}}{2} & \frac{q^{(1)} - q^{(2)}}{2} & -\left(q^{(4)} - \frac{q^{(1)} + q^{(2)}}{2}\right) & -\left(\frac{q^{(1)} + q^{(2)}}{2} - q^{(3)}\right) \\ \frac{u^{(1)} + u^{(2)}}{2} & \frac{u^{(1)} - u^{(2)}}{2} & -\left(u^{(4)} - \frac{u^{(1)} + u^{(2)}}{2}\right) & -\left(\frac{u^{(1)} + u^{(2)}}{2} - u^{(3)}\right) \\ \frac{v^{(1)} + v^{(2)}}{2} & \frac{v^{(1)} - v^{(2)}}{2} & -\left(v^{(4)} - \frac{v^{(1)} + v^{(2)}}{2}\right) & -\left(\frac{v^{(1)} + v^{(2)}}{2} - v^{(3)}\right) \end{pmatrix}.$$

Таким образом, задача определения элементов МОРС на основе экспериментально полученных компонентов векторов Стокса принимаемого обратного рассеянного излучения представляется решённой. Рассмотрим процедуру определения компонентов этих векторов. Приёмная система ВМПЛ НИ ТГУ включает в себя блок трансформации состояния поляризации принимаемого излучения и призму Волластона, разделяющую принимаемое излучение на два взаимно ортогонально поляризованных пучка. Поскольку матрицы преобразования всех поляризационных элементов лидарного приёмника (стало быть, и приборные векторы) известны, выразим компоненты векторов Стокса принимаемого излучения через измеряемые интенсивности его поляризационных компонент.

Рассмотрим сначала параллельный канал приёмной системы лидара, чему соответствует верхний индекс «А» у приборных векторов. При этом будем считать, что дальнейшие соображения будут излагаться при фиксированном состоянии поляризации зондирующего излучения и одинаково справедливы для

каждого из них. В первом положении блока трансформации состояния поляризации принимаемого излучения на пути его распространения расположено пустое окно. Принимая во внимание (2.1), получим связь компонентов ненормированного вектора Стокса принимаемого излучения после его преобразования приёмной системой лидача:

$$\begin{pmatrix} I^{(1)(A)} \\ Q^{(1)(A)} \\ U^{(1)(A)} \\ V^{(1)(A)} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \times \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \times \begin{pmatrix} I+Q \\ I+Q \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Первый компонент вектора Стокса излучения, преобразованного приёмной системой лидача, имеет физический смысл измеряемой интенсивности. Совокупное действие всех поляризационных элементов приёмной системы (в данном случае, призмы Волластона) описывается приборным вектором  $G_1^{(A)} = \frac{1}{2}(1 \ 1 \ 0 \ 0)$ . Выполнив матричное произведение, сосредоточимся на измеряемой интенсивности излучения:  $I^{(A)} = \frac{1}{2}(I+Q)$ .

Во втором окне поляризационной приставки лидарного приёмника установлена полуволновая фазовая пластина, ориентированная быстрой осью под углом  $45^\circ$  к приёмному базису. Тогда преобразование состояния поляризации принимаемого излучения приёмной системой лидача описывается уравнением

$$\begin{pmatrix} I^{(2)(A)} \\ Q^{(2)(A)} \\ U^{(2)(A)} \\ V^{(2)(A)} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \times \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix}.$$

В этом случае приёмная система имеет приборный вектор  $G_2^{(A)} = \frac{1}{2}(1 \ -1 \ 0 \ 0)$ , а измеряемая с её помощью интенсивность излучения равна  $I^{(2)(A)} = \frac{1}{2}(I-Q)$ .

Третье положение поляризационной приставки вводит в приёмный тракт четвертьволновую пластину, установленную под углом  $135^\circ$  к приёмному базису. В этом случае состояние поляризации принимаемого излучения изменяется согласно уравнению

$$\begin{pmatrix} I^{(3)(A)} \\ Q^{(3)(A)} \\ U^{(3)(A)} \\ V^{(3)(A)} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \times \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix}.$$

При этом воздействие приёмной системы на состояние поляризации принимаемого излучения описывается приборным вектором  $G_3^{(A)} = \frac{1}{2}(1 \ 0 \ 0 \ 1)$ , а измеряемая с её помощью интенсивность излучения равна  $I^{(3)(A)} = \frac{1}{2}(I + V)$ .

Наконец, четвёртое положение блока трансформации состояния поляризации принимаемого излучения включает полуволновую пластину, повернутую на угол  $157,5^\circ$  относительно приёмного базиса. Этому положению соответствует уравнение

$$\begin{pmatrix} I^{(4)(A)} \\ Q^{(4)(A)} \\ U^{(4)(A)} \\ V^{(4)(A)} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \times \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix}.$$

Тогда приёмная система имеет приборный вектор  $G_4^{(A)} = \frac{1}{2}(1 \ 0 \ -1 \ 0)$ , а измеряемая с её помощью интенсивность излучения равна  $I^{(4)(A)} = \frac{1}{2}(I - U)$ .

Выразив из измеряемых интенсивностей поляризационных составляющих принимаемого излучения компоненты его вектора Стокса, получим:



$$\begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_1^{(A)} + I_2^{(A)} \\ I_1^{(A)} - I_2^{(A)} \\ -\left(2I_4^{(A)} - (I_1^{(A)} + I_2^{(A)})\right) \\ 2I_3^{(A)} - (I_1^{(A)} + I_2^{(A)}) \end{pmatrix}.$$

Полный оборот поляризационного блока приёмной системы лидара позволяет определить все компоненты вектора Стокса обратно рассеянного излучения. Таким образом, комбинирование поляризационных элементов передающей и приёмной антенн лидара обеспечивает экспериментальное определение всех шестнадцати элементов МОРС исследуемого объёма. Следует обратить внимание на тот факт, что второму каналу приёмной системы соответствует иная матрица преобразования призмы Волластона:

$$\begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \text{ вследствие чего, выполнив аналогичные преобразования,}$$

получим:

$$G_1^{(B)} = \frac{1}{2}(1 \ -1 \ 0 \ 0), \quad I_1^{(B)} = \frac{1}{2}(I - Q);$$

$$G_2^{(B)} = \frac{1}{2}(1 \ 1 \ 0 \ 0), \quad I_2^{(B)} = \frac{1}{2}(I + Q);$$

$$G_3^{(B)} = \frac{1}{2}(1 \ 0 \ 0 \ -1), \quad I_3^{(B)} = \frac{1}{2}(I - V);$$

$$G_4^{(B)} = \frac{1}{2}(1 \ 0 \ 1 \ 0), \quad I_4^{(B)} = \frac{1}{2}(I + U).$$

Соответственно, компоненты вектора Стокса обратно рассеянного излучения определяются интенсивностями, измеряемыми вторым каналом приёмной системы лидара следующим образом:

$$\begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_1^{(B)} + I_2^{(B)} \\ -(I_1^{(B)} - I_2^{(B)}) \\ 2I_4^{(B)} - (I_1^{(B)} + I_2^{(B)}) \\ -(2I_3^{(B)} - (I_1^{(B)} + I_2^{(B)})) \end{pmatrix}.$$

В качестве иллюстрации, в таблице 2.2 представлены результаты измерений, выполненных на лидаре НИ ТГУ в условиях безоблачной атмосферы. Как видно из таблицы, компоненты векторов Стокса, получаемые в измерениях обоими приёмными каналами, практически идентичны.

Таблица 2.2 – Примеры векторов Стокса обратно рассеянного излучения, полученных в условиях отсутствия облаков (11.12.2018 г., 14:32–14:49, высота 2,4 км)

Приёмный канал		Параллельный				Ортогональный			
Векторы Стокса излучения	Зондирующее	$\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}$
	Обратно рассеянное	$\begin{pmatrix} 1,00 \\ 0,95 \\ -0,13 \\ -0,07 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1,00 \\ -0,93 \\ 0,01 \\ 0,06 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1,00 \\ 0,01 \\ 0,00 \\ -0,86 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1,00 \\ 0,05 \\ 0,95 \\ -0,04 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1,00 \\ 0,94 \\ -0,04 \\ 0,09 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1,00 \\ -0,98 \\ -0,03 \\ 0,03 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1,00 \\ -0,03 \\ 0,07 \\ -0,83 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1,00 \\ 0,05 \\ 0,93 \\ -0,19 \end{pmatrix}$

Наличие двух поляризационных каналов в приёмной системе лидара позволяет получать МОРС облаков как с использованием каждого канала по отдельности, так и на основе их совместного использования [26]. Отметим, что описанные здесь векторы Стокса зондирующего излучения и приборные векторы приёмных каналов лидара НИ ТГУ реализуются с 2016 г.

#### 2.4 Процедуры обработки результатов лидарных экспериментов и их программная реализация

До 2013 г. программное обеспечение для управления оборудованием лидара НИ ТГУ представляло собой совокупность отдельных программ для

управления контроллером шаговых двигателей, счётчиком фотонов и лазером. Синхронизация процессов запуска перечисленных компонент лидара производилась вручную. Оба этих фактора не только уменьшали скорость проведения экспериментов, но и увеличивали риск возникновения ошибок и потери данных из-за человеческого фактора. При обработке результатов эксперимента возникали проблемы, связанные с экспортом данных в необходимые программные пакеты. Оператору требовалось около 2 часов рабочего времени на обработку результатов одного эксперимента. При этом за день производилось от 5 до 10 экспериментов [136]. В 2013 г. большинство сложностей измерений, связанных с разнородностью программного обеспечения управления системами лидара, было устранено с введением единой информационной системы. Введение параллельного накопления лидарных сигналов в 2016 г. повлекло за собой и доработку программы для управления им. Вместе с тем, обработка экспериментальных данных по-прежнему выполнялась, в основном, в системе работы с электронными таблицами Microsoft Excel. Поиск метео данных и их загрузка, которые рассмотрены отдельно в п.2.5, также выполнялись вручную с использованием веб-браузера. Настоящий раздел посвящён описанию алгоритмов и программного обеспечения, используемых для обработки лидарных данных, разработанных специально для лидара НИ ТГУ после его модернизации 2016 г. Отметим, что разработанный пакет прикладных программ построен на модульном принципе и может быть адаптирован для обработки данных, получаемых на других экспериментальных установках.

#### **2.4.1 Выбор временного интервала измерений для анализа**

Результаты измерений на ВМПЛ НИ ТГУ хранятся в сжатом виде для уменьшения объёма хранимых файлов. Их обработка начинается с визуализации временной динамики вертикального профиля интенсивности лидарного сигнала (рисунок 2.3). Цветами на рисунке проиллюстрирована интенсивность сигнала от одного высотного строба для каждого отдельного

импульса лазера. Синий цвет соответствует минимальной интенсивности, а красный – максимальной. Благодаря визуализации возможен выбор режима суммирования сигналов как по всему временному диапазону серии измерений, так по интервалу времени, в течение которого регистрировался или, наоборот, отсутствовал аэрозольный слой. Кроме того, на этой стадии обработки лидарных данных возможно суммирование результатов нескольких отдельных серий измерений. Такая “склейка” данных позволяет охватить более широкий временной интервал [141, 142].

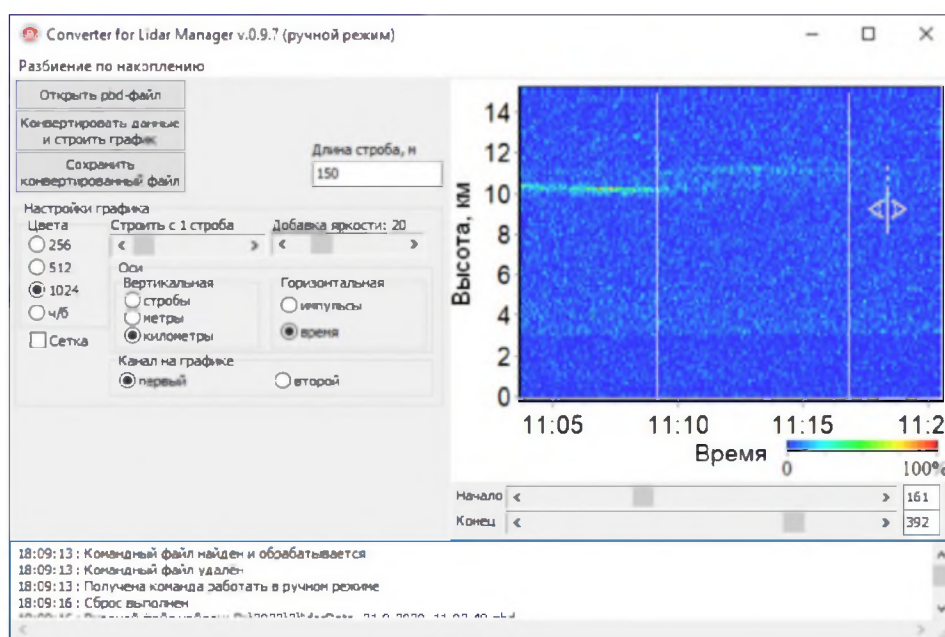


Рисунок 2.3 – Пользовательский интерфейс конвертера лидарных данных

Предварительная обработка лидарных данных включает в себя сглаживание методом наименьших квадратов с целью подавления статистического шума сигнала, коррекцию просчётов и последствия ФЭУ приёмной системы лидара, а также коррекцию уровня шума [143, 144]. Последующая визуализация результатов измерений для обоих приёмных каналов позволяет оценить геометрические характеристики аэрозольных образований (см. рисунок 2.2) или констатировать состояние безоблачной атмосферы. В зависимости от даты и времени эксперимента выполняется программный поиск и загрузка соответствующих метеорологических данных [21, 145] (описаны в п.2.5).

## 2.4.2 Определение высот нижней и верхней границ, отношения рассеяния и оптической толщи ОВЯ

На следующем этапе обработки экспериментальных данных определяются высоты нижней и верхней границ аэрозольного слоя, рассчитываются отношение рассеяния и оптическая толщина, а также МОРС для каждого высотного строба в пределах границ слоя [145, 146]. Пользовательский интерфейс соответствующей программы представлен на рисунке 2.4.

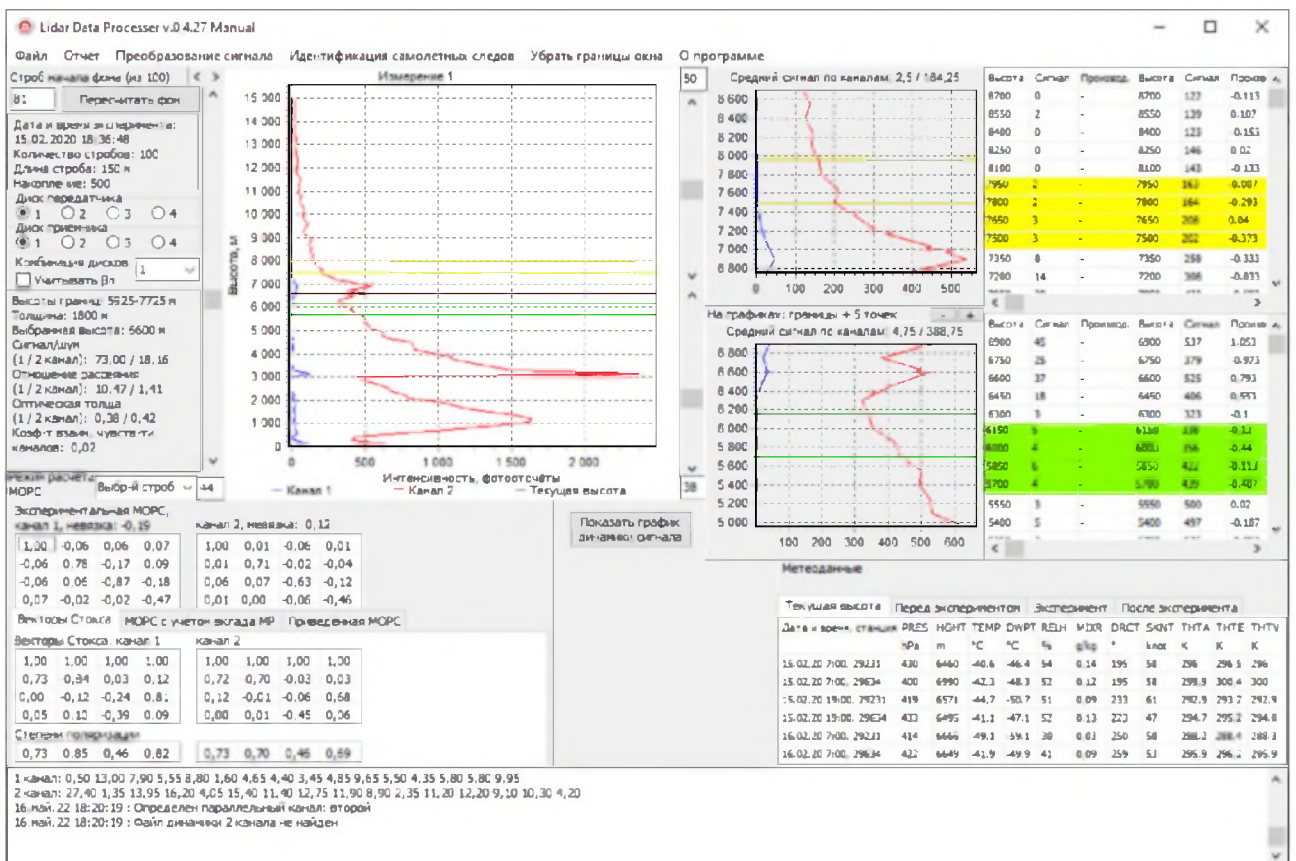


Рисунок 2.4 – Пользовательский интерфейс программы обработки лидарных данных [145]

Обработка лидарных сигналов основана на применении уравнения лазерного зондирования (УЛЗ). В скалярном виде (для мощности) оно имеет вид [129]:

$$P(z) = kP_0 G(z) \frac{A}{z^2} \frac{c\tau_n}{2} \sigma_\pi(z) e^{-2\tau(z)},$$

где  $P(z)$  – мощность сигнала обратного рассеяния, принятого с расстояния  $z$ ;  $k$  – коэффициент пропускания оптических элементов приёмопередающей

системы лидара;  $P_0$  – средняя мощность импульса зондирующего излучения;  $G(z)$  – геометрическая функция лидара;  $A$  – эффективная площадь апертуры приёмной системы;  $c$  – скорость света в воздухе;  $\tau_u$  – длительность импульса лазера;  $\sigma_\pi(z)$  – коэффициент обратного рассеяния;  $\tau(z) = \int_0^z \alpha(z) dz$  – оптическая толщина по трассе зондирования от лидара до рассеивающего объёма на расстоянии  $z$ .

Методика оценки высоты  $H_1$  нижней границы облака подобна описанной в [147]. Сначала предварительно обработанные профили лидарного сигнала визуализируются разработанным программным обеспечением. Затем визуально находится область высот в подоблачном слое, в которой наблюдается изменение знака высотного градиента профиля лидарного сигнала, и анализируется последовательность отсчётов мощности сигнала в этом слое  $P(h_i)$ . После этого выбирается пара следующих друг за другом стробов  $h_k$  и  $h_{k+1}$  (минимальная величина строба  $\Delta h = 37,5$  м), таких, чтобы во втором из них (соответствующем большей высоте) величина сигнала возросла более чем на 10% относительно величины сигнала в предыдущем стробе. Высота  $h_k$  первого из этих стробов принимается за положение точки, в которой высотный градиент профиля лидарного сигнала равен нулю. Тогда высоту нижней границы облака  $H_1$  можно оценить как среднее значение из высот 4-х последовательных стробов  $H_1 = 1/4 (h_k + h_{k-1} + h_{k-2} + h_{k-3})$ . Такой алгоритм принимается для того, чтобы исключить возможный случай ложной оценки  $H_1$ , когда на этой высоте нет облачного аэрозоля, а присутствует только фоновый, характерный для безоблачной атмосферы. Высота  $H_2$  верхней границы облачного слоя определяется аналогичным образом, с тем отличием, что в рассматриваемых парах соседних стробов анализируется уменьшение сигнала.

Для количественной характеристики рассеивающих свойств частиц в ОВЯ используется величина отношения рассеяния  $R$ , которая рассчитывается как отношение суммы коэффициентов обратного аэрозольного ( $\beta_\pi^a$ ) и

молекулярного ( $\beta_{\pi}^m$ ) рассеяния ко второму из них:  $R = (\beta_{\pi}^m + \beta_{\pi}^a) / \beta_{\pi}^m$ . Как правило, толщина ОВЯ  $\Delta H = H_2 - H_1$  мала ( $\Delta H / H_1 \ll 1$ ), а величина  $\beta_{\pi}^m$  на верхней и нижней границах ОВЯ отличается незначительно (в пределах 10%). Поэтому параметр  $R$  можно оценить как отношение максимальной мощности  $P_{\max}(h_m)$  лидарного сигнала от облака к мощности сигнала  $P(H_1)$  от слоя атмосферы, находящегося на высоте нижней границы облака  $H_1$ :

$$R = P_{\max}(h_m) / P(H_1).$$

Интегральную оптическую толщину облака  $\tau_h = \int_{H_1}^{H_2} \alpha(z) dz$  найдём, используя

УЛЗ:

$$\frac{P(H_2)}{P(H_1)} = \frac{\sigma_{\pi}(H_2) H_1^2}{\sigma_{\pi}(H_1) H_2^2} e^{-2\tau_h}.$$

Как говорилось выше, для ОВЯ выполняется соотношение  $\Delta H / H_1 \ll 1$ , поэтому можно считать, что  $\sigma_{\pi}(H_1) \approx \sigma_{\pi}(H_2)$ , и тогда оценка  $\tau_h$  упрощается:

$$\tau_h \approx \frac{1}{2} \ln \frac{P(H_1) H_1^2}{P(H_2) H_2^2}.$$

Вместе с тем, определяемая описанным образом величина используется в настоящей работе только в качестве одного из индикаторов преимущественной горизонтальной ориентации ледяных частиц в ОВЯ. Тем не менее, чтобы исключить возможные разночтения, будем называть эту величину лидарной оптической толщиной, опуская далее по тексту слово “лидарной”.

Облака с преимущественной горизонтальной ориентацией ледяных частиц (зеркальные) идентифицируются [21, 29, 146] согласно критерию: отношение рассеяния  $R \geq 10$ , оптическая толщина  $\tau_h \leq 1$  и элемент МОРС  $m_{44} \leq -0,4$ .

### 2.4.3 Преобразования МОРС ОВЯ

В диссертациях Б.В. Кауля [26] и С.В. Насонова [138] рассмотрены причины возникновения погрешностей определения МОРС по данным

поляризационного лазерного зондирования в режиме последовательного накопления лидарных сигналов для расчёта отдельных элементов МОРС. Использование параллельного накопления сигналов позволяет значительно увеличить количество накопленных одноэлектронных импульсов в стробе и таким образом оценить интенсивность отражённого облаком излучения с погрешностью не хуже 3%. При оптической толщине облачного слоя более 0,5–0,7 дополнительная обработка позволяет учесть вклад 2-ой кратности рассеяния [148] в лидарном сигнале, а по его поляризационным характеристикам получить информацию о микроструктуре регистрируемых в эксперименте облачных образований [149].

Процедура обработки МОРС ОВЯ, полученных на основе измерений ВМПЛ НИ ТГУ, включает коррекцию вклада многократного рассеяния на основе минимизации параметра невязки в случае их большой оптической толщины. При зондировании облаков, состоящих из несферических ледяных кристаллов, помеха, связанная с многократным рассеянием зондирующего излучения, отличается высокой деполяризацией по всей глубине облака. Эти особенности могут быть использованы для учёта влияния многократного рассеяния при интерпретации данных лидарных экспериментов по зондированию кристаллических облаков. Алгоритм [150], реализующий такую коррекцию, использует методику Б.В. Кауля [26]. Он основан на допущении малости деполяризации оптического излучения на несферических ледяных частицах и её независимости от глубины проникновения зондирующего импульса в среду.

Оценка вклада многократного рассеяния в общий поток рассеянного излучения на основе описанного алгоритма возможна только при определении полной МОРС. При обычных для лазерного зондирования диаграммах направленности приемной антенны порядка 1 мрад приближение однократного рассеяния выполняется достаточно хорошо. Но при зондировании из космоса, когда расстояние от лидара до облака может составлять сотни километров, поперечный размер рассеивающего объема становится сравнимым или



превышает длину свободного пробега фотона. В этом случае многократное рассеяние может превысить однократное уже вблизи верхней границы облака. Указанные факторы указывают на актуальность описанного алгоритма коррекции матриц обратного рассеяния на искажения, вносимые многократным рассеянием [26].

Дальнейшая обработка лидарных данных включает приведение МОРС к плоскости вертикальной симметрии [151, 152]. Такая коррекция нужна для сопоставления как результатов различных отдельных лидарных экспериментов между собой, так и экспериментально полученных МОРС с теоретически рассчитанными. Элементы экспериментально получаемых МОРС облаков зависят от азимутального угла поворота базиса лидарного приёмника. В свою очередь, МОРС облаков, получаемые в результате теоретических расчётов, вычисляются в базисе, связанном с плоскостью падения излучения на ледяную пластинку в облаке. Для совместного анализа экспериментальных и теоретических результатов необходимо привести и те, и другие матрицы к единому базису. Выполнить это требование позволяет приведение экспериментально полученной МОРС к плоскости вертикальной симметрии, в результате чего матрица преобразуется к блочно-диагональному виду. Элементы такой матрицы выражаются через параметры, не зависящие от случайных значений азимутального угла поворота системы координат, что позволяет сопоставлять и сравнивать МОРС, полученные в разных сериях экспериментов, между собой, а также и с рассчитанными теоретически.

В самом общем виде МОРС произвольной частицы определяется 10 параметрами, так как для её недиагональных элементов всегда выполняются соотношения [153]:

$$\begin{aligned}
 M_{ij} &= M_{ji}, \text{ если } i \text{ или } j \neq 3; \\
 M_{ij} &= -M_{ji}, \text{ если } i \text{ или } j = 3; \\
 M_{11} - M_{22} - M_{44} + M_{33} &= 0.
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$

Поскольку частицы облаков рассеивают независимо, МОРС рассеивающего объёма представляет собой сумму матриц всех входящих в него

частиц, и для её элементов также выполняются указанные соотношения. Однако МОРС ансамбля частиц может описываться гораздо меньшим числом параметров, если ансамбль обладает той или иной симметрией. Поскольку любое вращение вокруг оси  $z$  переводит хаотический ансамбль в самого себя, его МОРС должна быть инвариантна относительно вращения системы координат, в которой производится описание матрицы, на произвольный угол  $\Phi$ . Математическая запись инвариантности МОРС относительно операции вращения имеет вид [29]:

$$\mathbf{M}' = \mathbf{R}(\Phi) \mathbf{M} \mathbf{R}(\Phi) = \mathbf{M}.$$

Единственной МОРС, удовлетворяющей ей, является матрица вида [153]:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} A & 0 & 0 & H \\ 0 & E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -E & 0 \\ H & 0 & 0 & C \end{bmatrix}$$

или её частный случай, когда  $H = 0$ . Ван де Хюльст определил [98] такую матрицу как МОРС ансамбля асимметричных частиц одного сорта с вращательной симметрией, зависящую от четырёх параметров. На самом деле, независимых параметров три, поскольку из указанного соотношения (2.2) диагональных элементов МОРС следует их связь:

$$E = (A - C) / 2.$$

Кроме того, при наличии выделенной плоскости, содержащей ось  $z$ , относительно которой ансамбль частиц обладает зеркальной симметрией, и при совпадении плоскости референции с этой плоскостью МОРС может быть представлена в блочно-диагональном виде [153]:

$$\mathbf{M}_0 = \begin{bmatrix} A & B & 0 & 0 \\ B & E+F & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -E+F & D \\ 0 & 0 & -D & C \end{bmatrix}. \quad (2.3)$$

Если речь идёт о смешанном ансамбле, в котором некоторые частицы ориентированы хаотически, то параметры  $B$ ,  $D$ ,  $F$  определяются только подансамблем ориентированных частиц, а  $A$ ,  $E$ ,  $C$  – всем ансамблем и по-

прежнему остаются инвариантами операции вращения. В случае, когда плоскости референции и зеркальной симметрии не совпадают и угол между ними равен  $\pm \Phi_0$ , а  $B$  и  $D$  не равны нулю, все элементы МОРС, кроме  $M_{14}$  и  $M_{41}$ , отличны от нуля. Но матрицу  $M(\Phi_0)$  можно привести к виду (2.3):

$$R(\Phi_0) M(\pm\Phi_0) R(\Phi_0) = M_0, \quad (2.4)$$

причём угол  $\Phi_0$  определяется из отношения элементов МОРС:

$$\Phi_0^{(1;2)} = \text{arctg} \left( -\frac{M_{21}}{M_{31}} \pm \sqrt{\left(\frac{M_{21}}{M_{31}}\right)^2 + 1} \right).$$

Матрица преобразования имеет вид:

$$R(\Phi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\Phi & \sin 2\Phi & 0 \\ 0 & -\sin 2\Phi & \cos 2\Phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Направления  $\Phi_0^{(1)}$ ,  $\Phi_0^{(2)}$  взаимно ортогональны. Если в выражении (2.4) под матрицей  $M(\Phi_0)$  понимать экспериментально полученную МОРС, то преобразованную таким образом матрицу  $M_0$  называют приведённой к плоскости симметрии или, для краткости, приведённой МОРС [29].

Если ансамбль частиц состоит из хаотически ориентированных частиц одного сорта или нескольких подансамблей хаотически ориентированных частиц разных сортов и одного или нескольких подансамблей частиц, подверженных действию некоторого ориентирующего фактора, так что образуется выделенная плоскость зеркальной симметрии, то измеренная МОРС может быть приведена к виду:

$$M^{(0)} = M_{11}^{(0)} \begin{pmatrix} 1 & m_{12}^{(0)} & 0 & m_{14}^{(0)} \\ m_{21}^{(0)} & m_{22}^{(0)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{33}^{(0)} & m_{34}^{(0)} \\ m_{41}^{(0)} & 0 & m_{43}^{(0)} & m_{44}^{(0)} \end{pmatrix}. \quad (2.5)$$

Как для любой МОРС, для её элементов выполняются соотношения:

$$\begin{aligned} m_{12}^{(0)} &= m_{21}^{(0)}, \\ m_{34}^{(0)} &= -m_{43}^{(0)}, \end{aligned}$$

$$m_{14}^{(0)} = m_{41}^{(0)},$$

$$1 - m_{22}^{(0)} - m_{44}^{(0)} + m_{33}^{(0)} = 0.$$

Область определения элементов нормированной матрицы  $m_{ij} \in [-1; 1]$ . Алгоритм получения МОРС построен таким образом, что нормирующий множитель  $M_{11}$  – коэффициент обратного рассеяния для неполяризованного света – сокращается уже на этапе вычислений нормированных неприведённых матриц, которые и представляют собой непосредственный экспериментальный результат. Затем к этим матрицам применяется операция приведения (2.4) и получается матрица  $M^{(0)}$ , стоящая в (2.5) [26].

Таким образом, операция приведения сводится к поиску значения угла поворота  $\Phi$ , при котором МОРС принимает блочно-диагональный вид. Задача нахождения этого угла является нетривиальной, поскольку параметры преобразования относительно этого угла нелинейны, а элементы исходной МОРС несут в себе ошибки эксперимента. Решить её позволяет приведение её к линейному виду и решение методом линейной регрессии [143, 152]. Обработанные таким образом экспериментально полученные МОРС перистых облаков инвариантны относительно азимутальной ориентации, а потому пригодны для сопоставления между собой и с рассчитанными теоретически. Такое сопоставление позволяет решить обратную задачу для оценки параметров микроструктуры исследуемого облака.

По завершению описанной обработки лидарных данных [145] автоматически формируется единый отчёт, одним из вариантов которого является файл в формате текстового процессора Microsoft Word [154]. Пример такого отчёта приведён на рисунке 2.5.

Внедрение описанного программного пакета в методику обработки данных лидара НИ ТГУ сохранило возможность работы с данными экспериментов, выполненных до введения единой информационной системы управления лидаром 2013 г. и модернизации лидара 2016 г. Экспериментальный массив, накопленный за время работы лидара с конца

2009 г. по весну 2020 г. содержит результаты около 3 тысяч экспериментов, а потому сохранение этой возможности было необходимым.

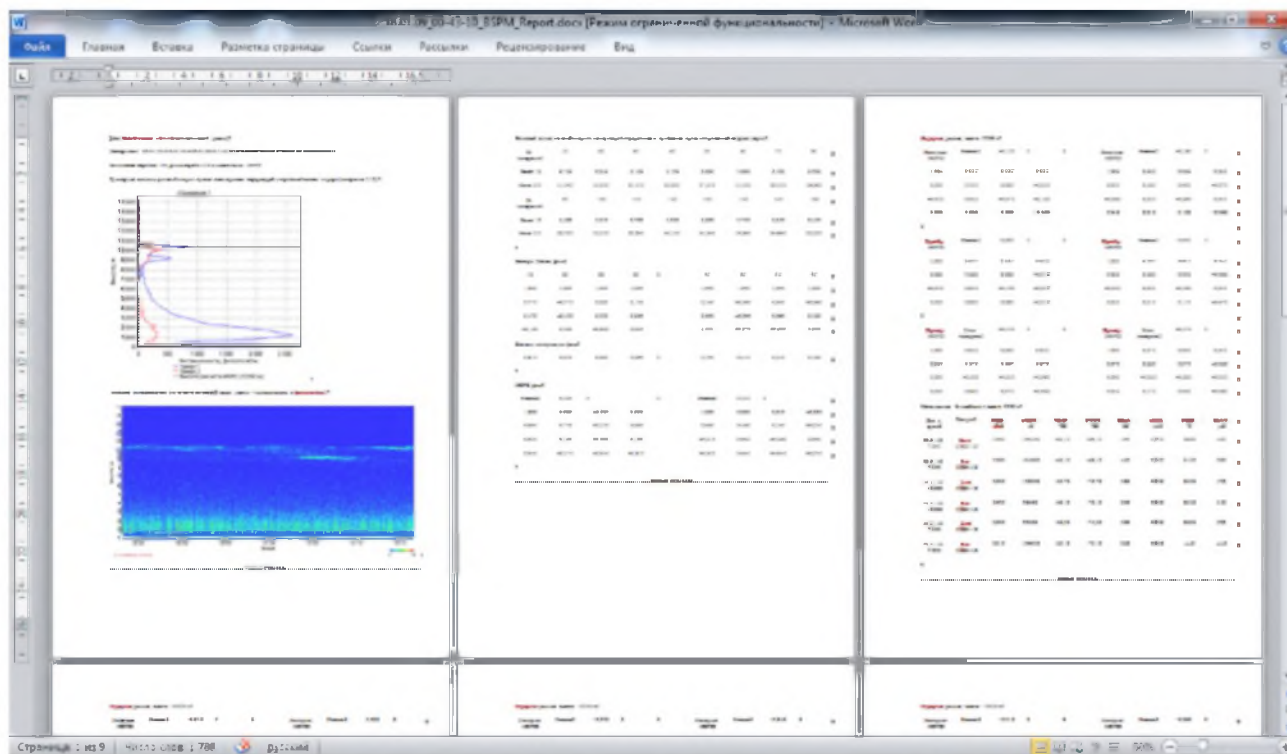


Рисунок 2.5 – Пример программно сгенерированного отчёта об обработке экспериментальных данных

Использование описанного программного продукта значительно повысило оперативность обработки лидарных данных, исключило ряд возможных ошибок оператора и упростило систематизацию результатов. Кроме того, значительно повысилась информационная обеспеченность оператора, предоставив ему более широкий спектр получаемых параметров, чем был доступен ранее, при этом количество выполняемых им манипуляций разительно сократилось. Это позволило выделить массив результатов экспериментов по зондированию конденсационных следов самолётов (рассмотрены в п.2.6 и 3.3), а также выделить и проанализировать результаты суточных лидарно-актинометрических измерений (рассмотрены в п.2.7 и 3.4).

## **2.5 Метеорологические условия формирования облаков верхнего яруса и их сопоставление с результатами лидарных экспериментов**

Результаты лидарных измерений сопоставляются с метеорологическими данными, соответствующими дате и времени эксперимента, а также высоте регистрируемых в экспериментах аэрозольных образований [21, 155]. Используются данные измерений аэрологических станций, находящихся в Колпашево и Новосибирске, как наиболее близких к месту расположения ВМПЛ НИ ТГУ. Они загружаются с сайта Вайомингского университета (США) [27] и находятся в свободном доступе. Несмотря на удалённость указанных населённых пунктов от Томска (дистанция от Томска до Колпашево ~240 км, до Новосибирска – ~250 км), метеорологическая обстановка на высотах формирования ОВЯ по данным обеих станций обычно близка. Опыт сопоставления метеоданных с указанных станций между собой и с прогнозами [156] Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) показал [157], что обстановка для этих высот не различается существенно для Колпашево, Новосибирска и Томска.

В свободном доступе находятся данные измерений на аэрологических станциях, выполняемые два раза в сутки (00Z и 12Z UTC; UTC – всемирное координированное время; с 29 мая 2016 г. Томское время – UTC+7 часов). В таблице 2.3 приведён пример массива метеоданных, полученных на аэрологической станции Колпашево. Указанное направление ветра соответствует метеорологическому, а не аэронавигационному, направлению ветра, т.е. указывает, откуда он дует [158]. Значение 0° соответствует Северу.

Процесс поиска и загрузки метеоданных автоматизирован. Кроме того, разработан и используется программно-алгоритмический комплекс для автоматического сбора прогностической информации и её рассылки для планирования лидарных экспериментов и оптимизации времени эксплуатации оборудования и рабочего времени персонала [160].

Таблица 2.3 – Пример вертикальных профилей метеорологических величин по данным аэрологических измерений\* (Колпашево, 11 декабря 2018 г., 19:00 местного времени) [27]

PRES	HGHT	TEMP	DWPT	RELH	MIXR	DRCT	SKNT	THTA	THTE	THTV
1014	143	-19,9	-20,0	99	0,78	160	4	252,2	254,4	252,4
1000	249	-16,3	-18,9	80	0,86	175	4	256,9	259,2	257,0
944	691	-9,7	-19,2	46	0,89	240	4	267,9	270,5	268,0
925	847	-7,3	-19,3	38	0,90	235	4	271,8	274,5	272,0
910	975	-3,5	-23,5	20	0,64	233	4	277,0	279,0	277,1
861	1411	-2,5	-25,5	15	0,56	227	4	282,5	284,3	282,6
850	1512	-3,5	-25,5	16	0,57	225	4	282,5	284,3	282,6
777	2217	-7,1	-18,1	41	1,19	211	4	285,9	289,6	286,1
748	2511	-8,7	-20,8	37	0,98	205	4	287,3	290,4	287,5
700	3024	-11,5	-25,5	30	0,69	235	4	289,7	292,0	289,8
622	3922	-15,7	-33,7	20	0,36	276	4	294,9	296,1	294,9
538	4999	-23,5	-36,5	29	0,31	327	4	298,0	299,1	298,1
525	5176	-24,8	-37,8	29	0,28	335	4	298,6	299,6	298,6
500	5530	-27,3	-40,3	28	0,23	350	6	299,7	300,5	299,7
400	7100	-38,5	-51,5	24	0,08	350	8	304,9	305,2	304,9
300	9020	-53,3	-66,3	19	0,02	350	14	310,1	310,2	310,1
256	10006	-61,5	-74,5	16	0,01	350	15	312,4	312,4	312,4
250	10150	-62,5	-74,5	18	0,01	350	16	313,0	313,1	313,0
206	11341	-68,7	-80,7	16	0,00	350	17	321,1	321,1	321,1
200	11520	-68,5	-80,5	16	0,00	350	19	324,1	324,1	324,1
184	12026	-66,5	-78,5	17	0,00	350	19	335,2	335,2	335,2
161	12836	-63,3	-75,3	18	0,01	340	22	353,6	353,7	353,6
150	13270	-63,9	-75,9	18	0,01	335	23	359,8	359,9	359,8
133	14003	-64,7	-76,7	18	0,01	330	23	371,0	371,1	371,0
100	15740	-66,5	-78,5	17	0,01	325	31	399,0	399,0	399,0
96	15987	-65,9	-77,9	17	0,01	325	33	404,8	404,9	404,8
95,9	15994	-65,9	-77,9	17	0,01	325	33	404,9	405,0	404,9
70	17890	-69,1	-81,1	16	0,01	330	43	436,2	436,3	436,2
60	18797	-70,8	-82,8	16	0,01	335	45	452,2	452,2	452,2
50	19870	-72,7	-84,7	15	0,01	330	51	471,8	471,8	471,8
49	19988	-72,9	-84,9	15	0,01	329	51	474,0	474,1	474,0
44	20617	-73,5	-85,9	14	0,01	325	52	487,5	487,5	487,5
41	21030	-73,8	-86,5	13	0,01	10	54	496,5	496,5	496,5

\*В таблице использованы обозначения: PRES – атмосферное давление (гПа); HGHT – геопотенциальная высота (м); TEMP – температура (°C); DWPT – точка росы (°C); RELH – относительная влажность (%); MIXR – отношение смешивания (г/кг); DRCT – направление ветра (°); SKNT – скорость ветра (уз; 1 уз = 0,51 м/с); THTA, THTE и THTV – потенциальная, эквивалентная потенциальная и виртуальная потенциальная температура (К) соответственно [159].

Отметим, что диапазон высот измерений, как и их шаг по высоте, не являются одинаковыми для каждого отдельного измерения. Это усложняет обработку вертикальных профилей метеорологических величин и их использование для интерпретации лидарных данных.

## **2.6 Расчёт параметров дрейфа конденсационных следов самолётов**

ВМПЛ НИ ТГУ находится в южной части Томска, примерно в 0,5 км от берега р. Томь, в южной его части ( $56^{\circ}26'$  с. ш.  $84^{\circ}58'$  в. д.) [155, 157]. В радиусе 100 км от точки стояния лидара расположен ряд трасс регулярного гражданского авиасообщения (рисунок 2.6). При благоприятных метеорологических условиях конденсационный след самолёта от пролетевшего самолёта перемещается ветром и дрейфует на высотах 6–10 км над точкой расположения лидара, что позволяет изучать как геометрические, так и оптические характеристики таких аэрозольных образований [155, 161, 162]. Идентификация самолётных следов для интерпретации результатов экспериментов по их лазерному зондированию основана на совместном анализе траекторных, метеорологических и лидарных данных [163]. В качестве источника траекторий полётов самолётов используются данные ADS-B мониторинга (англ. «Automatic dependent surveillance-broadcast» – автоматическое зависимое наблюдение-вещание) с сайта [28].

На рисунке 2.7 изображён фрагмент самолётной траектории: показаны положения самолёта с соответствующими датой и временем, а в окне рядом с одной из точек траектории указаны высота, скорость и курс самолёта в ней. В нижнем окне на рисунке отображены рассчитанное расстояние от лидара НИ ТГУ до точки траектории и соответствующий азимут. Одним из критериев идентификации самолётных следов по данным лидарного зондирования является близость этого азимута к направлению ветра на соответствующей высоте. При этом предполагается, что остальные метеорологические величины должны оставаться на пути дрейфа следа неизменными и такими, чтобы за его время след не распался. Далее будем указывать местное, Томское, время.





Рисунок 2.6 – Трассы регулярного гражданского авиасообщения вблизи Томска [28, 155]

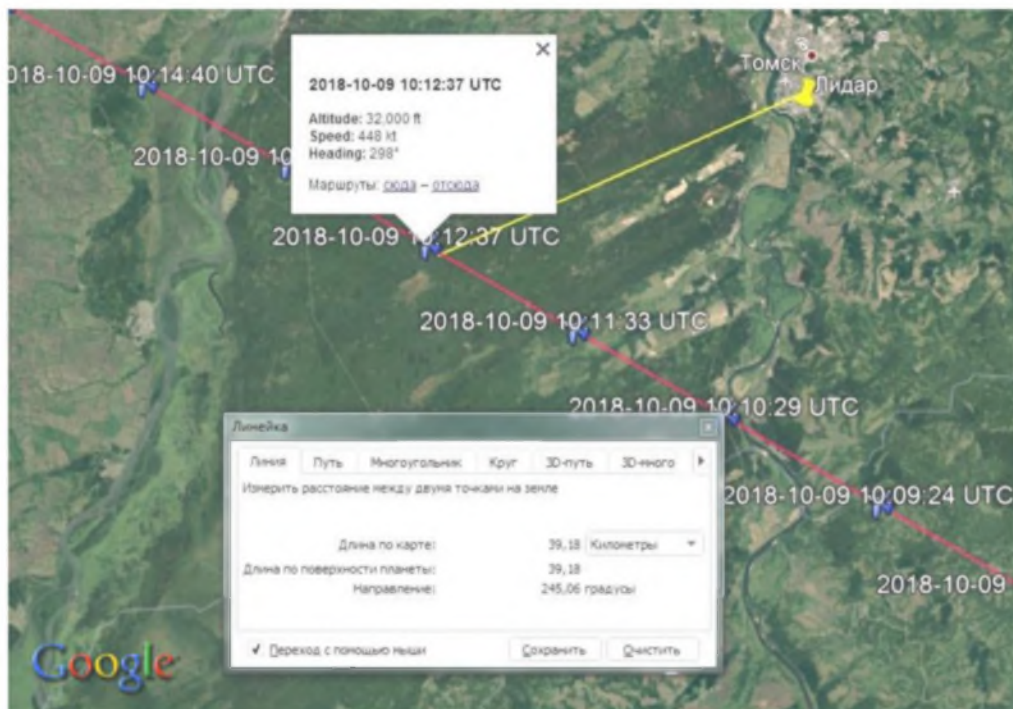


Рисунок 2.7 – Фрагмент траектории полёта самолёта вблизи Томска (рейс CA933, 09.10.2018 г.) [28, 155]; изображение получено с применением геоинформационной системы Google Earth

В таблице 2.4 представлен пример результата совместного анализа траекторных (см. рисунок 2.7) и соответствующих метеорологических данных. В зависимости от высоты полёта самолёта выбираются ближайшие высоты из

вертикальных профилей метеовеличин (по данным измерений на аэрологических станциях, расположенных в городах Колпашево и Новосибирск), для которых находятся соответствующие направление и скорость ветра. Затем через точку с координатами лидара на карте проводится прямая линия, имеющая направление, совпадающее с направлением ветра на высоте полёта самолёта, до её пересечения с траекторией самолёта. Расстояние между этой точкой и местоположением лидара вычисляется на основе их координат. С учётом скорости ветра оценивается длительность дрейфа конденсационного следа до места расположения лидара и время появления следа в поле зрения лидара. При этом предполагается неизменность метеорологических величин на всём пути дрейфа следа.

Таблица 2.4 – Результат совместного анализа траекторных и метеорологических данных (09.10.2018 г.) [155]

Траекторные данные (рейс CA933) [28]		
Время точки траектории полёта самолёта	17:12	
Высота точки траектории, км	9,75	
Метеорологические данные [27]		
Аэрологическая станция	Колпашево	Новосибирск
Время измерений	19:00	
Высота точки метеоданных*, км	10,3	9,9
Направление ветра**, °	245	268
Скорость ветра, м/с	27,8	24,2
Результат совместного анализа		
Дистанция дрейфа следа до лидара, км	39,2	61,6
Длительность дрейфа до лидара, мин	23,5	42,5
Оценённое время появления над лидаром	17:36	17:55

Примечание: \* – выбрано наиболее близкое к высоте полёта самолёта значение из доступных в соответствующих вертикальных профилях метеорологических величин; \*\* – указано метеорологическое направление ветра (см. п.2.5).

Поскольку направление и скорость ветра, измеренные на станциях Колпашево и Новосибирска, несколько отличаются, это, очевидно, влечёт за собой расхождение в оценках расстояния и длительности дрейфа самолётного следа с момента выброса продуктов сгорания топлива до точки расположения

лидара (см. таблицу 2.4). Вследствие этого параметры дрейфа следов рассчитываются независимо по данным обеих аэрологических станций.

На рисунке 2.8 показана временная динамика вертикального профиля интенсивности лидарного сигнала, полученная во время эксперимента, в течение которого наблюдалось появление конденсационного следа самолёта в поле зрения лидара и его исчезновение. Вертикальной белой чертой на рисунке 2.8а показано время появления следа над лидаром, совпавшее с оценённым на основе данных аэрологической станции, расположенной в г. Колпашево (17:36), на рисунке 2.8б – аналогичное время, оценённое по данным аэрологической станции Новосибирска, на рисунке 2.8в – время прекращения наблюдения этого следа.

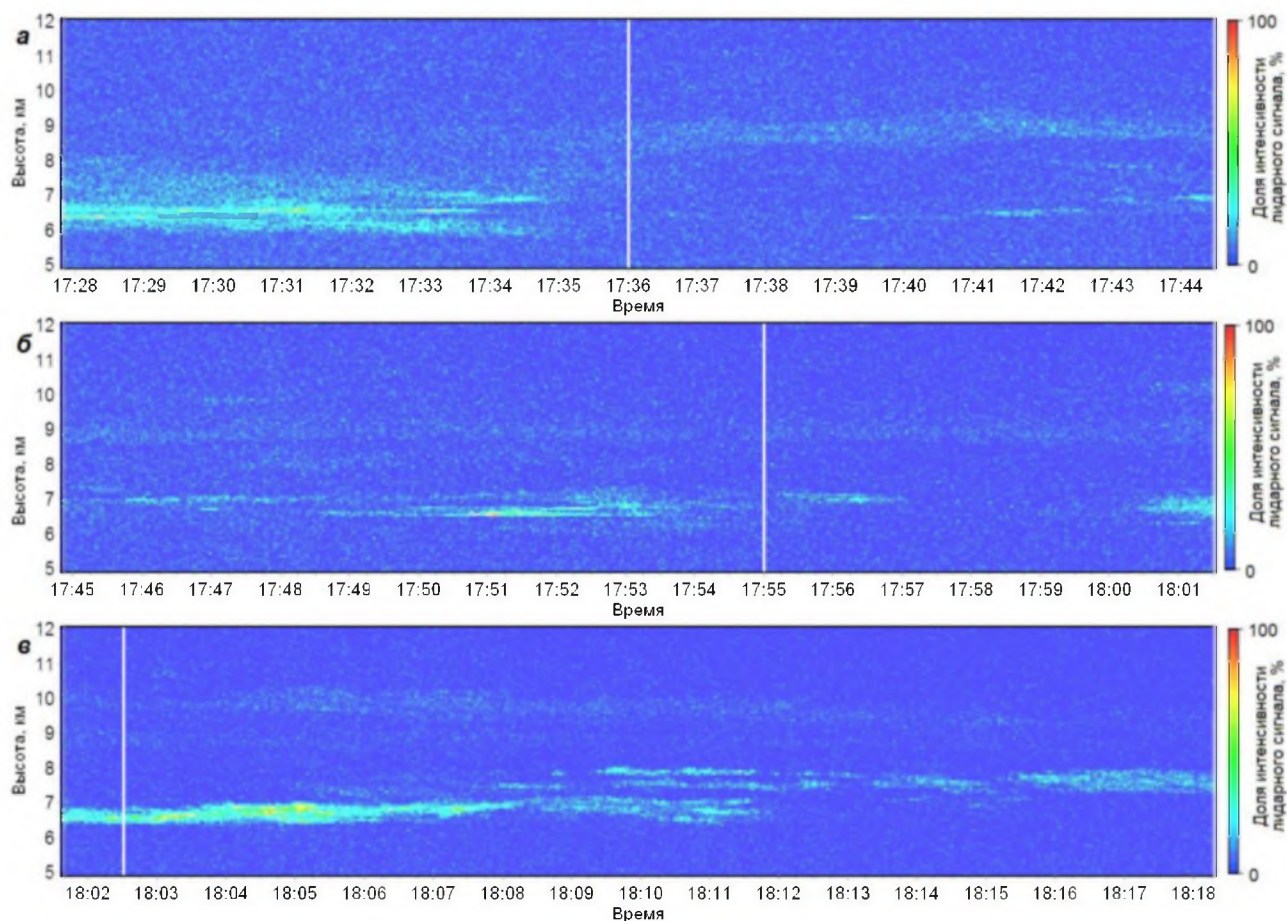


Рисунок 2.8 – Временная динамика вертикального профиля интенсивности лидарного сигнала, полученная в течение трёх последовательных серий лидарных измерений (09.10.2018 г.) [155]

Из рисунка видно, что с 17:36 в лидарном эксперименте регистрировался аэрозольный слой на высотах 8,5–9,5 км, что согласуется с высотой полёта самолёта (таблица 2.4). Полученное соответствие лидарных, метеорологических и траекторных данных позволяет квалифицировать наблюдаемый в эксперименте аэрозольный слой как конденсационный след самолёта. Повторим, что время появления самолётного следа в поле зрения приёмной системы лидара по данным эксперимента соответствует результатам оценки параметров дрейфа на основе данных аэрологической станции Колпашево, чего нельзя сказать о данных Новосибирской станции. Такая ситуация не является уникальной (например, [155]). Добавим, что процесс расчёта параметров дрейфа самолётных следов автоматизирован [164].

## **2.7 Временная коррекция данных комплексных лидарно-актинометрических экспериментов**

Расчёты потоков солнечной радиации с использованием теоретических моделей облачности и самолётные измерения радиации на различных уровнях показывают значительные расхождения этих потоков в коротковолновой области спектра [6]. На наш взгляд, весьма вероятной причиной расхождения является несовершенство микрофизической модели облаков и, в первую очередь, неучёт ориентации несферических ледяных частиц в кристаллических облаках. Теоретические оценки влияния степени ориентации кристаллических ледяных частиц перистой облачности на солнечную радиацию, приходящую на Земную поверхность, в настоящее время затруднены (и даже невозможны), поскольку нет адекватной модели матрицы рассеяния (ослабления) излучения перистыми облаками, учитывающей пространственную ориентацию кристаллов льда в них [165].

В сети станций Росгидромета применяется стандартная методика [166], рекомендованная Всемирной метеорологической организацией, по которой 6 раз в сутки в определённые сроки (в 00:30, 06:30, 09:30, 12:30, 15:30 и 18:30 по



среднему солнечному времени) определяется баланс коротковолновой радиации

$$B_{\text{к}} = S \cdot \sin h + D - R_{\text{к}} = Q - R_{\text{к}},$$

где  $S$  и  $D$  – измеренные значения прямой и рассеянной радиации при безоблачном небе при одном и том же угле высоты стояния Солнца  $h$ ,  $Q$  – суммарная радиация,  $R_{\text{к}}$  – часть суммарной радиации, отражённой от деятельной поверхности. Измерение прямой радиации  $S$  производится актинометром, нацеленным на Солнце. Рассеянная радиация  $D$  измеряется с помощью пиранометра с затеняющим диск Солнца экраном. Отражённая радиация  $R_{\text{к}}$  измеряется также с помощью пиранометра, направленного вертикально вниз. Для автоматизации актинометрических измерений используется треккер, который в каждый момент времени отслеживает положение Солнца. Такой подход реализован на сети базовых станций по исследованию радиационных процессов Baseline Surface Radiation Network (BSRN) [167]. Однако реализация этого метода связана с существенными затратами, так как стоимость треккера и его эксплуатации достаточно высока. Поэтому часто оценка приходящей суммарной солнечной радиации  $Q$  производится с помощью одиночного незатенённого пиранометра [168]. Достоинством такого способа является отсутствие подвижных частей, которые необходимо нацеливать на Солнце, а недостатком – невозможность разделения измеренных значений суммарной радиации  $Q$  на прямую  $S$  и рассеянную  $D$ . Для оценки влияния перистой облачности на  $S$  и  $D$  используются коэффициенты ослабления прямой радиации  $C_S = S/S_0$  и изменения рассеянной радиации  $C_D = D/D_0$ , для чего дополнительно при ясном небе измеряются величины прямой  $S_0$  и рассеянной  $D_0$  радиации. В связи с тем, что лазерное поляризационное зондирование перистых облаков происходит в зенитной области (в угле не более  $5^\circ$ ), коэффициент  $C_S$  определяется путём измерения прямой радиации  $S$  в предположении, что микроструктура и морфология облака, закрывающего Солнце в момент измерения и находящегося над точкой

измерения, одинакова [165]. Пример суточного хода суммарной радиации  $Q$  при наличии облачности представлен на рисунке 2.9.

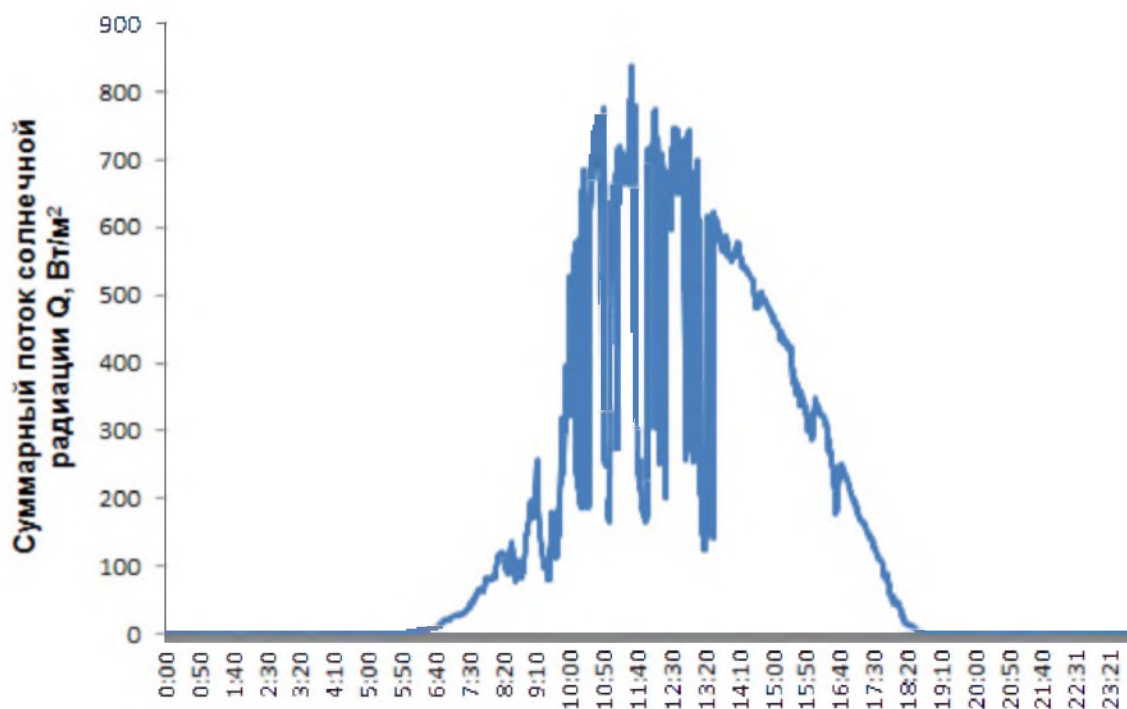


Рисунок 2.9 – Суточный ход суммарной радиации (13.09.2019 г.)

Исследования оптических и радиационных свойств кристаллических облаков с помощью актинометрических измерений проводились и раньше. Известны работы по изучению воздействия ОВЯ на интенсивность солнечной радиации в различных диапазонах длин волн по данным Звенигородского эксперимента (1986, 1987, 1989 гг.) [12]. Также оптические и радиационные свойства кристаллических облаков и их микроструктура описаны в работе [37]. Недостатком указанных работ является то, что они базируются на субъективных оценках форм балла перистой облачности, что существенно снижает объективность отражения состояния небосвода. Кроме того, актинометрические измерения осуществлялись вручную и с довольно большими временными интервалами. Использование современных автоматических регистраторов прямой, рассеянной и суммарной радиации совместно с инструментальным определением балла облачности, работающих с большой частотой и синхронно с лидарными измерениями, может существенно

уточнить радиационные свойства перистых облаков не только в зависимости от их формы, но и от вида, а в некоторых случаях и от разновидности [169].

Любая форма облачности имеет свои характерные особенности в части их оптической толщи, которые можно разделить по признакам "просвечивающие – полупросвечивающие – непросвечивающие облака" [17]. Применяя такое деление, ОВЯ можно отнести к облакам, в основном, слабо влияющим как на прямую, так и на рассеянную радиацию. Например, все виды и разновидности тонкой и просвечивающей перисто-кучевой облачности (*Cc*) слабо влияют на величину как  $S$ , так и  $D$ ). Перистые плотные облака (*Ci sp.*) представляют собой отдельные разбросанные по небосводу массы облаков, которые слабо увеличивают  $D$ , но при попадании на диск Солнца могут значительно (до 2-х раз) уменьшать величину  $S$ . Актинометрические измерения проводятся не только в интегральном (ИР) ( $\lambda = 280\text{--}2800$  нм), но и в фотосинтетически активном (ФАР) ( $\lambda = 400\text{--}700$  нм) диапазоне солнечной радиации, границы которого лежат ближе к длине волны излучения используемого лазера ( $\lambda = 532$  нм) [169].

Совместный анализ результатов исследований оптических свойств ОВЯ, выполняемых с применением разнесённых в пространстве экспериментальных установок, требует введения единой временной шкалы. В п.3.4 приведён анализ комплексного эксперимента, выполняемого при совместном использовании лидара НИ ТГУ и зенитного пиранометра ИМКЭС СО РАН, здесь же ограничимся описанием методических вопросов, связанных с временной коррекцией таких данных. Установки разнесены друг от друга на расстояние около 6 км; их расположение на карте Томска изображено на рисунке 2.10. Поскольку не всегда ОВЯ одновременно попадают в поле зрения и лидара, и пиранометра, необходимо оценивать и учитывать длительность дрейфа облака от одного пункта до другого. Для этого на основе анализа лидарных данных определяются высоты границ исследуемого облака, после чего для них определяются соответствующие характеристики ветра по данным аэрологических измерений [27]. В случаях, когда его направление не совпадает

с направлением «пиранометр–лидар», для временной коррекции вводится вспомогательная точка. Её координаты (точка Т на рисунке 2.10) рассчитываются [163] так, чтобы азимут от пиранометра на неё совпадал с направлением ветра, а азимут от лидара был перпендикулярным ему.

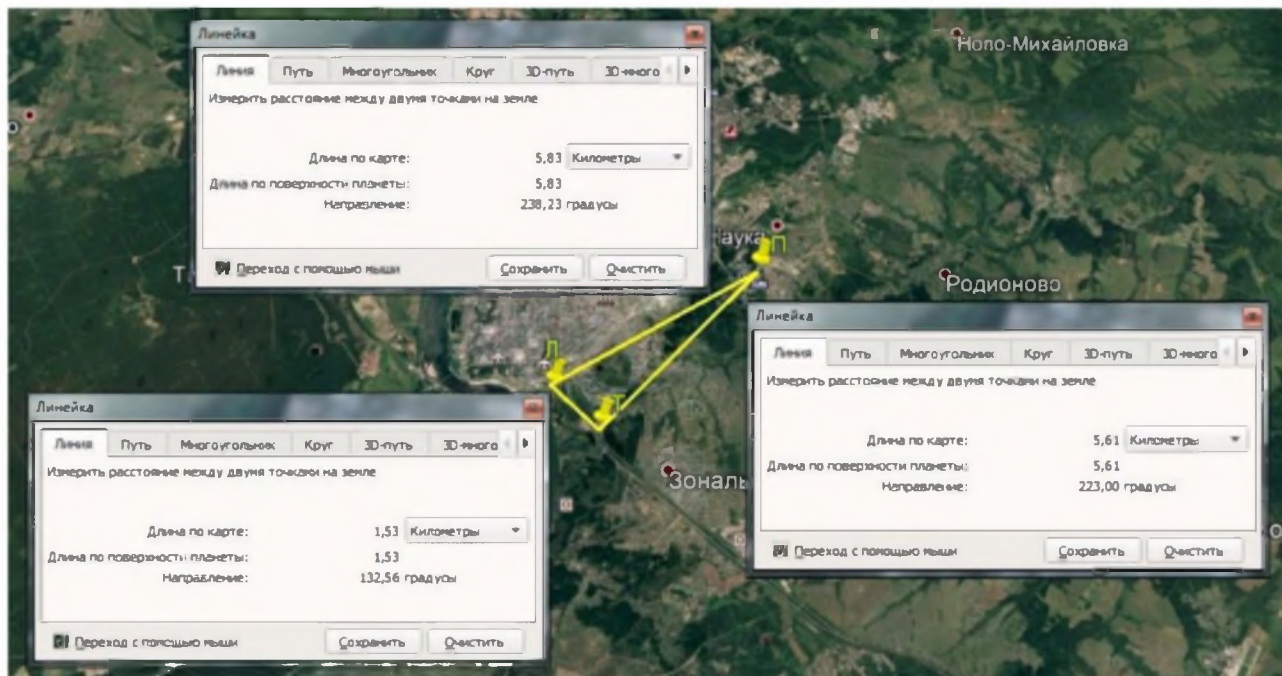


Рисунок 2.10 – Расположение лидара (Л), пиранометра (П) и вспомогательной точки (Т) [172]; изображение получено с применением геоинформационной системы Google Earth

Алгоритм основан на предположении, что для заданного момента времени микрофизические свойства исследуемого облака в рассчитанной условной точке и в месте расположения лидара совпадают. Очевидно, это предположение тем менее уместно, чем дальше условная точка находится от места расположения лидара. После расчёта координат точки Т постоянный вектор «Л–П» представляется в виде разложения на компоненты «Л–Т» и «Т–П». Расстояние «Т–П» используется при расчёте параметров дрейфа облака от лидара к пиранометру (или в обратном направлении, в зависимости от направления ветра). Процесс поиска условной точки и расчёта временного сдвига результатов измерений, выполняемых на одной экспериментальной установке, относительно данных другого для их совместного анализа [170] автоматизирован.



## Основные выводы по главе 2

Во второй главе описаны метод ПЛЗ, используемый для оперативного дистанционного исследования ОВЯ, включая конденсационные следы самолётов. Описано оборудование ВМПЛ НИ ТГУ, принцип его работы и методика проводимых с его помощью экспериментов. Рассмотрены методические вопросы экспериментального получения векторов Стокса обратно рассеянного исследуемыми облаками излучения и их МОРС. Представлены процедуры и алгоритмы обработки лидарных данных и перечислены ограничения используемых подходов.

Отдельно приведена методика расчёта параметров дрейфа конденсационных следов самолётов к месту расположения ВМПЛ для их идентификации на основе совместного анализа траекторных, метеорологических и лидарных данных. Эта методика получила развитие в расчётах временного сдвига при совместном анализе данных комплексных лидарно-актинометрических экспериментов.

Описанное программное обеспечение для обработки лидарных данных и определения на их основе оптических и микрофизических характеристик ОВЯ разработано для ВМПЛ. Модульное устройство программного пакета позволяет адаптировать его для обработки данных, получаемых с помощью других экспериментальных установок.

### **Глава 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЛАКОВ ВЕРХНЕГО ЯРУСА**

Настоящая глава посвящена результатам исследований оптических и геометрических характеристик облаков верхнего яруса естественного и антропогенного происхождения. Как отмечалось в п.2.2, эксперименты по поляризационному лазерному зондированию ОВЯ систематически выполняются на лидаре НИ ТГУ с 2009 г. До модернизации лидара 2016 г. накопление лидарных сигналов велось в режиме последовательной смены комбинаций поляризационных элементов передающей и приёмной систем лидара. В течение заданного оператором времени сигналы накапливались для одной комбинации, затем – для следующей. Так сменялись все 16 комбинаций одной серии измерений, необходимые для получения полной МОРС облака. Очевидно, что при стандартном времени накопления, составляющем 50–100 секунд для одной комбинации, за время одной серии измерений либо в поле зрения лидара попадали различные локальные области облака, либо облако регистрировалось в течение измерений не со всеми комбинациями. Такой подход применим только в предположении, что в генеральном ансамбле сохраняются микрофизические характеристики частиц, влияющие на поляризацию излучения, при этом допускаются лишь вариации их концентрации. В результате модернизации лидара поляризационные блоки в приёмной и передающей системах лидара стали вращаться непрерывно, обеспечивая постоянную смену поляризационных элементов. Это позволило при работе лазера с частотой 10 Гц в течение 2-х секунд провести цикл регистрации лидарных сигналов при 16 комбинациях поляризационных элементов в каналах приёмопередатчика. Многократное повторение этого цикла даёт возможность вести параллельное накопление 16 интенсивностей, необходимых для оценки полной МОРС. При такой методике определения МОРС все лидарные сигналы формируются практически одними и теми же объёмами облака при одинаковых условиях. Это существенно снижает методическую погрешность оценки МОРС.

### 3.1 Обнаружение и исследование характеристик зеркальных и незеркальных областей в облаках верхнего яруса

В массиве измерений ВМПЛ НИ ТГУ 2016–2020 гг. выбраны данные экспериментов, по результатам обработки которых идентифицированы ОВЯ с преимущественной горизонтальной ориентацией ледяных кристаллов. Эксперименты выбирались так, чтобы в течение каждой серии измерений регистрировались не только зеркальные облака, но и безоблачная атмосфера. Выборка содержит данные 11 серий, каждая – длительностью 16 минут 40 секунд. В качестве примера рассмотрим результаты измерений одной из них, выполненной 8.01.2018 г. Оптические и геометрические характеристики зарегистрированного облака, оценённые на основе анализа лидарных сигналов, накопленных в течение серии измерений, представлены в таблице 3.1. Их значения позволяют классифицировать зарегистрированное облако как зеркальное.

Таблица 3.1 – Характеристики облака по данным серии лидарных измерений (8.01.2018 г., 11:37–11:54)

Отношение рассеяния	Оптическая толщина	Диапазон высот, км	МОРС (9,2 км)
13,44	0,25	9,1–9,5	$\begin{pmatrix} 1 & 0,01 & -0,11 & 0,19 \\ 0,01 & 0,82 & -0,01 & -0,09 \\ 0,11 & -0,12 & -0,86 & 0,05 \\ 0,19 & 0,16 & 0,12 & -0,97 \end{pmatrix}$

Разделим (см. п.2.4.1) время рассматриваемой серии измерений на 5 интервалов равной длительности (по 3 минуты 20 секунд) и рассмотрим результаты обработки накопленных в течение них данных как для независимых серий по отдельности. Временная динамика вертикального профиля интенсивности лидарного сигнала представлена на рисунке 3.1; вертикальными линиями обозначены границы интервалов. Заметим, что в течение 4-го интервала (примерно с 11:48 по 11:51) облако регистрировалось лишь в течение нескольких первых десятков секунд, а в течение 5-го не регистрировалось вовсе (всплеск интенсивности сигнала на высотах, соответствующих

зарегистрированному облаку, не превышал фоновых колебаний, а отношение сигнал/шум было меньше единицы).

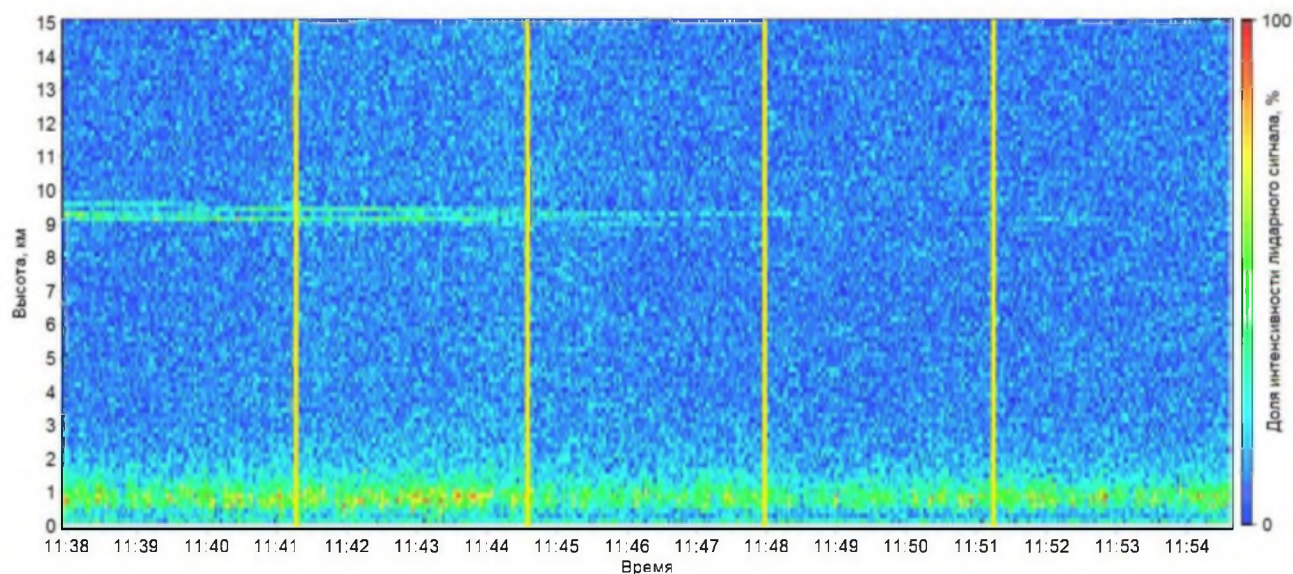


Рисунок 3.1 – Временная динамика вертикального профиля интенсивности лидарного сигнала (8.01.2018 г., 11:37–11:54)

В таблице 3.2 приведены оптические и геометрические характеристики зарегистрированного облака, полученные в результате обработки лидарных сигналов, накопленных в течение каждого из 5-ти описанных интервалов по отдельности. Символом  $\Delta$  обозначена невязка элементов главной диагонали МОРС:  $\Delta = |1 - m_{22} + m_{33} - m_{44}|$ , отличие от нуля которой характеризует влияние многократного рассеяния [26]: чем больше величина невязки, тем больше вклад многократного рассеяния. Указанные высоты для расчёта МОРС соответствуют максимуму лидарного сигнала от облака.

По данным 1 и 2-го интервалов (см. таблицу 3.2) значения отношения рассеяния  $R > 10$  (28,83 и 17,40 соответственно), оптической толщи  $\tau < 1$  (0,36 и 0,17 соответственно) и элемента МОРС  $m_{44} < -0,4$  (-0,79 и -0,89 соответственно) позволяют идентифицировать наблюдавшиеся в течение этих интервалов области зондируемого облака как содержащие горизонтально ориентированные ледяные кристаллы. Области облака, зарегистрированные в течение 3 и 4-го интервалов, не были зеркальными, о чём свидетельствуют значения отношения рассеяния  $R < 10$  (6,94 и 4,16 соответственно).

Примечательно, что невязка  $\Delta$  элементов главной диагонали МОРС меньше 0,1 в течение 1 и 2-го интервалов (0,09 и 0,04, соответственно) и больше 0,2 в течение 3 и 4-го (0,21 и 0,23 соответственно). Этот факт качественно подтверждает вывод о преимущественной горизонтальной ориентации ледяных кристаллов в локальных областях облака, зарегистрированных в течение 1 и 2-го интервалов, и её отсутствие по данным, накопленным в течение 3 и 4-го.

Таблица 3.2 – Оптические и геометрические характеристики локальных областей облака, зарегистрированного в течение отдельных интервалов равной длительности в серии лидарных измерений 8.01.2018 г., 11:37–11:54

Время	$h$ , км	$R$	$\tau$	МОРС (9,2 км)	$\Delta$
11:37:55– 11:41:15	9,2–9,5	28,83	0,36	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & -0,16 & -0,16 \\ 0 & 1 & -0,10 & 0,02 \\ 0,16 & -0,14 & -0,88 & 0,04 \\ -0,16 & 0,07 & -0,15 & -0,79 \end{pmatrix}$	0,09
11:41:15– 11:44:35	9,1–9,4	17,40	0,17	$\begin{pmatrix} 1 & 0,01 & -0,13 & -0,17 \\ 0,01 & 0,99 & -0,10 & -0,03 \\ 0,13 & 0,07 & -0,86 & -0,10 \\ -0,17 & 0,17 & -0,23 & -0,89 \end{pmatrix}$	0,04
11:44:35– 11:47:55	9,1–9,4	6,94	0,78	$\begin{pmatrix} 1 & -0,04 & 0,06 & 0,18 \\ -0,04 & 0,83 & -0,06 & 0,11 \\ -0,06 & -0,08 & -0,96 & 0,07 \\ 0,18 & 0,11 & -0,04 & -1,00 \end{pmatrix}$	0,21
11:47:55– 11:51:15	9,1–9,4	4,16	0,54	$\begin{pmatrix} 1 & 0,21 & -0,23 & -0,64 \\ 0,21 & 0,67 & 0,11 & -0,17 \\ 0,23 & -0,05 & -0,63 & 0,14 \\ -0,64 & 0,12 & -0,98 & -0,53 \end{pmatrix}$	0,23
11:51:15– 11:54:35	Облако на высотах 9,1–9,4 км не зарегистрировано (сигнал/шум < 1)				

Рассмотрим результаты той же серии измерений, но с иным способом деления на интервалы. Зафиксируем общее для всех интервалов начало (старт серии), а их длительность каждого определим добавлением ко времени завершения предыдущего того же отрезка 3 минуты 20 секунд, что и в первом разбиении. Очевидно, 5-й интервал будет представлять собой время всей серии измерений, а 1-й – совпадать для обоих способов деления. Как видно из таблицы 3.3, по данным, полученным на основе лидарных сигналов, просуммированных по таким временным интервалам, облако регистрировалось

и имело свойства зеркального в течение каждого из них.

Таблица 3.3 – Оптические и геометрические характеристики облака, зарегистрированного в течение отдельных интервалов возрастающей длительности в серии лидарных измерений 8.01.2018 г., 11:37–11:54

Время	$h$ , км	$R$	$\tau$	МОРС (9,2 км)	$\Delta$
11:37:55– 11:41:15	9,2–9,5	28,83	0,36	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & -0,16 & -0,16 \\ 0 & 1 & -0,10 & 0,02 \\ 0,16 & -0,14 & -0,88 & 0,04 \\ -0,16 & 0,07 & -0,15 & -0,79 \end{pmatrix}$	0,09
11:37:55– 11:44:35	9,2–9,5	22,17	0,23	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & -0,15 & -0,16 \\ 0 & 0,99 & -0,10 & 0 \\ 0,15 & -0,04 & -0,87 & -0,02 \\ -0,16 & 0,11 & -0,18 & -0,83 \end{pmatrix}$	0,03
11:37:55– 11:47:55	9,1–9,5	14,77	0,37	$\begin{pmatrix} 1 & 0,05 & -0,13 & -0,15 \\ 0,05 & 1,02 & -0,08 & -0,07 \\ 0,13 & -0,06 & -0,90 & -0,01 \\ -0,15 & 0,10 & -0,15 & -0,85 \end{pmatrix}$	0,07
11:37:55– 11:51:15	9,1–9,5	14,60	0,32	$\begin{pmatrix} 1 & -0,01 & -0,12 & 0,17 \\ -0,01 & 0,82 & -0,02 & -0,07 \\ 0,12 & -0,25 & -0,91 & -0,21 \\ 0,17 & 0,15 & -0,02 & -0,86 \end{pmatrix}$	0,13
11:37:55– 11:54:35	9,1–9,5	13,44	0,25	$\begin{pmatrix} 1 & 0,02 & -0,10 & -0,16 \\ 0,02 & 1,01 & -0,13 & -0,04 \\ 0,10 & -0,04 & -0,94 & 0 \\ -0,16 & 0,08 & -0,28 & -0,82 \end{pmatrix}$	0,13

Таким образом, регистрация зеркальных локальных областей облака в течение части времени серии измерений не позволяет идентифицировать его незеркальные области или отсутствие при увеличении времени накопления лидарных сигналов. Вместе с тем, уменьшение невязки  $\Delta$  от 1 интервала ко 2-му и её последующий рост в 3 и 4-м согласуется со временем регистрации зеркальных и незеркальных локальных областей облака. Подытожим: свойство преимущественной горизонтальной ориентации ледяных частиц в ОВЯ имеет локальный характер. Качественно, это заключение согласуется с обнаружением участков с повышенной турбулентностью на высотах формирования ОВЯ при помощи совместных лидарно-радарных измерений [171]. Более ранние оценки средней протяжённости турбулентных и спокойных зон в облаках разных форм [37] также показывали наличие неоднородностей пространственной

структуры турбулентности размерами в десятки километров в перистослоистых (Cs) облаках. Добавим, что при накоплении лидарных сигналов дольше 3 минут регистрация зеркальных областей ОВЯ предопределяет классификацию облака зеркальным на основании анализа данных измерений, несмотря на то, что не все локальные области исследуемого облака, попавшие в поле зрения лидара, были зеркальными. Отмеченный эффект наблюдается при регистрации в течение части времени серии лидарных измерений и незеркальных областей облака, и безоблачной атмосферы [172].

Выборка данных измерений на ВМПЛ НИ ТГУ 2016–2020 гг. объединила 1495 серий измерений (включая безоблачную обстановку; длительность серии обычно составляет 16 минут 40 секунд), выполненных в режиме параллельного накопления лидарных сигналов. Выделена 231 серия измерений, в течение которых регистрировались ОВЯ при отсутствии низкой облачности; идентифицирована 81 зеркальная локальная область таких облаков. Для каждой на основе лидарных данных определены временные интервалы регистрации и высоты, установлены соответствующие значения скорости ветра по данным аэрологических измерений. Зная скорость ветра и длительность нахождения зеркальной области облака над лидаром, нетрудно оценить размеры зеркальных областей ОВЯ в направлении, продольном относительно направления ветра. Гистограмма распределения таких оценок приведена на рисунке 3.2.

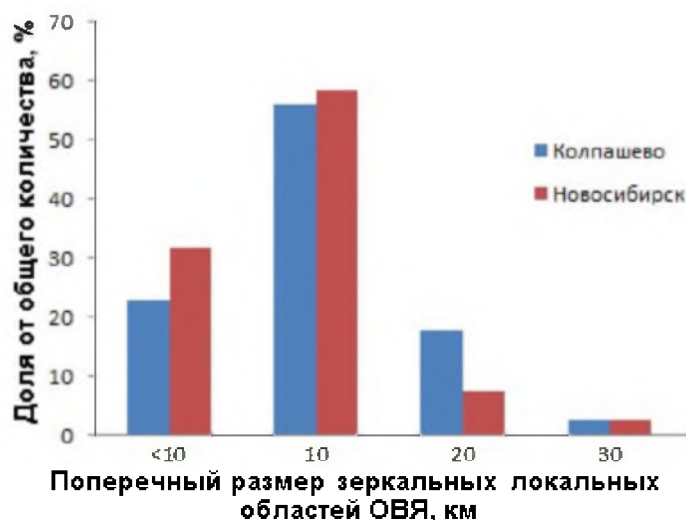


Рисунок 3.2 – Гистограмма распределения размеров зеркальных областей ОВЯ по данным зондирования на ВМПЛ НИ ТГУ (2016–2020 гг.) [173]

Как видно из рисунка 3.2, расхождение оценок, сделанных с использованием вертикальных профилей скорости ветра, полученных в измерениях на аэрологических станциях Колпашево и Новосибирска, невелико, поскольку метеорологическая обстановка на высотах формирования ОВЯ по данным этих станций обычно близка. Размеры зеркальных локальных областей ОВЯ лежат в диапазоне от 4 до 30 км, при этом в 56% случаев они составляют около 10 км и в 96% случаев – величину от 4 до 20 км. Доля случаев с наибольшим значением составляет 2% от общего количества. Полученные результаты позволяют заключить: помимо самого факта наличия зеркальных свойств у ОВЯ, который игнорируется в существующих моделях атмосферы, при расчётах радиационного баланса атмосферы следует учитывать и их неоднородность. Отметим, что оценить долю площади зеркальных локальных областей ОВЯ относительно всего облачного поля по данным описанной выборки не представляется возможным. Это вызвано тем, что возможность выполнения лидарных измерений ограничена рядом факторов, среди которых кучевая облачность, осадки и сильный ветер в приземном слое.

### **3.2 Оптические характеристики ОВЯ и метеорологические условия формирования преимущественной горизонтальной ориентации ледяных частиц в них**

Рисунок 3.3 иллюстрирует распределение количества серий измерений с параллельным накоплением лидарных сигналов в указанной выше (см. п.3.1) выборке 2016–2020 гг. (1495 серий измерений, включая безоблачную обстановку) по годам и по сезонам. В 2016 г. отрабатывалась методика параллельных измерений, измерения велись попеременно с последовательной схемой эксперимента (см. п.2.2). Увеличение частоты измерений в 2017 г. связано с наработкой методики параллельных измерений и отказом от последовательной схемы, а также введением в постоянную эксплуатацию программу планирования лидарных экспериментов [160]. В 2018 г. лидарные эксперименты выполнялись ещё более часто, что связано с расширением списка



используемых источников синоптической информации для планирования измерений и началом мониторинга авиационной обстановки [162]. Добавим, что снижение частоты лидарных измерений в 2020 г. связано с наступлением пандемии коронавирусной инфекции COVID-19 и введением ряда ограничений.

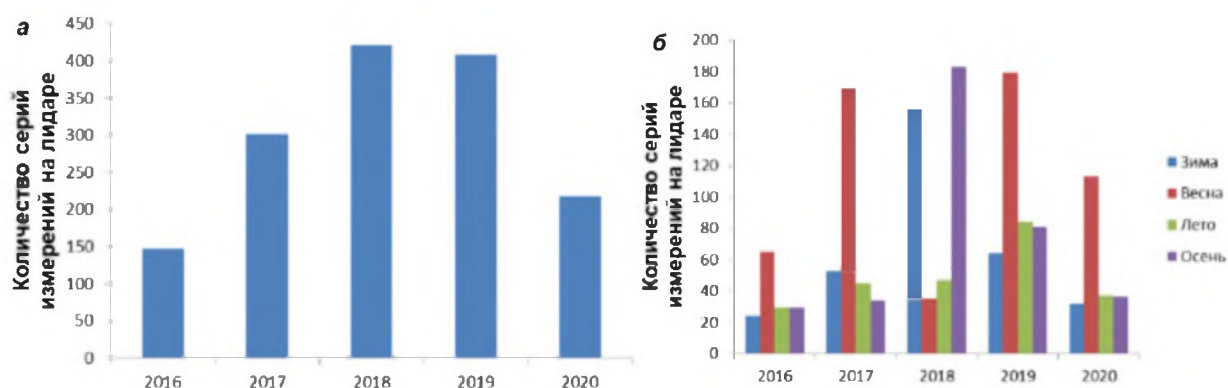


Рисунок 3.3 – Распределение количества серий измерений с параллельным накоплением лидарных сигналов на ВМПЛ НИ ТГУ по годам (а) и сезонам (б) (2016–2020 гг.) [174]

Примечательно преобладание (38%) количества измерений весной. Зимой и осенью было выполнено в 1,7 и 1,6 раза меньше измерений соответственно. Наименьшее количество сеансов зондирования выполнено летом (16%). Исключением является 2018 г., в течение которого преобладали зимние и осенние измерения. Описанное распределение, прежде всего, характеризует частоту случаев благоприятной для зондирования метеорологической обстановки: отсутствие кучевой облачности, осадков и сильного ветра в приземном слое. Несмотря на преобладание случаев таких условий весной, наибольшее количество ОВЯ зарегистрировано в лидарных измерениях зимой и примерно на 20% меньше – осенью (см. рисунок 3.4). Осенью зафиксировано наибольшее количество зеркальных областей ОВЯ, в то время как весной, напротив, наименьшее. Летом количество зарегистрированных ОВЯ и выявленных зеркальных их областей было существенно меньше.

Распределение количества наблюдавшихся ОВЯ и зеркальных среди них по месяцам представлено на рисунке 3.5. Наибольшее количество зеркальных

ОВЯ зарегистрировано в сентябре и октябре, при этом наибольшая доля зеркальных среди зарегистрированных – в августе. Добавим, что в июле за все годы выборки ОВЯ не наблюдались вовсе, а в ноябре, хоть и наблюдались, зеркальных свойств не имели.

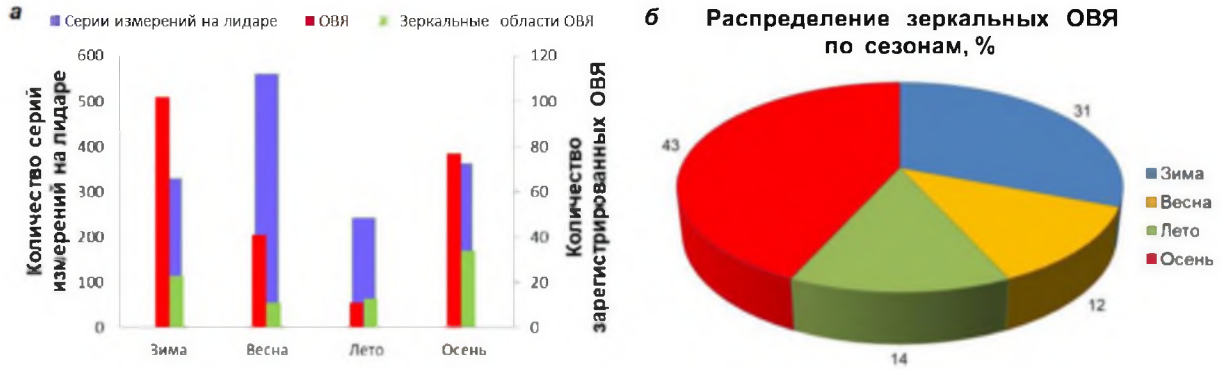


Рисунок 3.4 – Распределение количества серий измерений на ВМПЛ НИ ТГУ (а) и зарегистрированных зеркальных ОВЯ по сезонам (б) (2016–2020 гг.) [174]

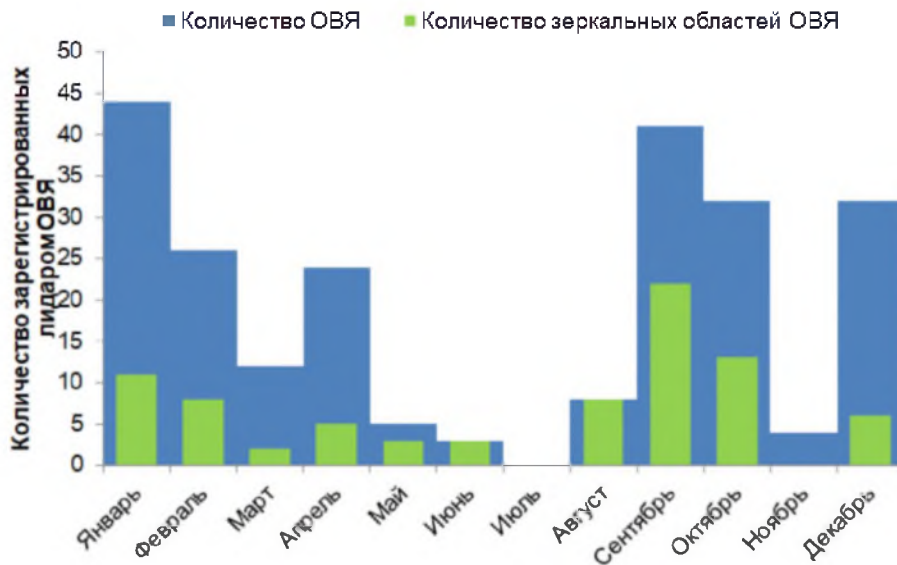


Рисунок 3.5 – Гистограмма распределения количества ОВЯ, зарегистрированных ВМПЛ НИ ТГУ, и количества зеркальных среди них (2016–2020 гг.) [173]

Рассмотрим оптические характеристики ОВЯ по данным лидарных измерений 2016–2020 гг. (231 серия измерений при отсутствии низкой облачности). Часть предварительных результатов представлена в работе [175]. На рисунках 3.6, 3.7 и 3.8 представлены гистограммы значений элемента  $m_{44}$

МОРС, отношения рассеяния  $R$  ОВЯ и оптической толщи  $\tau$  соответственно по данным упомянутого пятилетнего массива. Отметим наличие в выборке высокой доли измерений со значениями этих величин, характерными для зеркальных облаков (см. п.2.4.2).

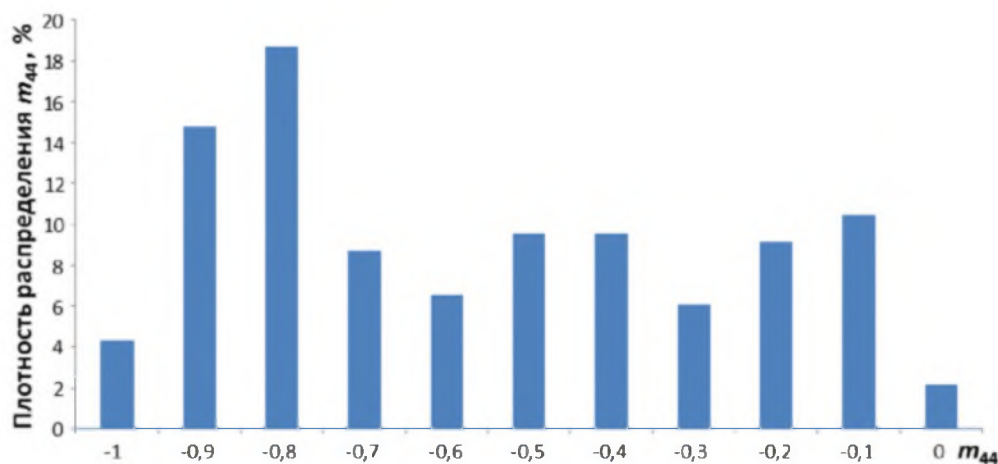


Рисунок 3.6 – Гистограмма распределения величины  $m_{44}$  МОРС ОВЯ по данным зондирования на ВМПЛ НИ ТГУ в 2016–2020 гг.

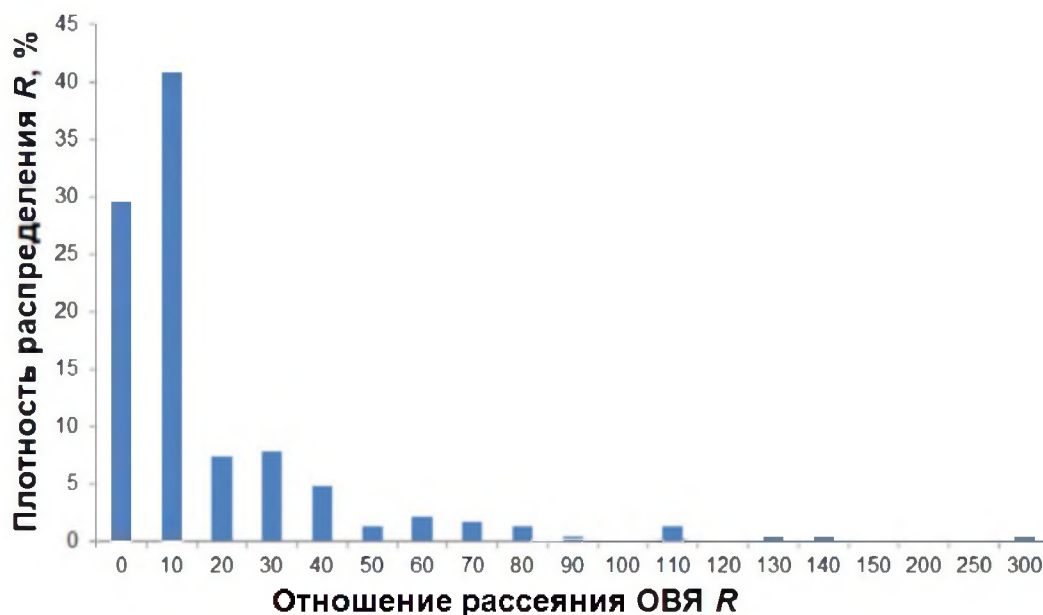


Рисунок 3.7 – Гистограмма распределения отношения рассеяния ОВЯ по данным зондирования на ВМПЛ НИ ТГУ в 2016–2020 гг.

В выборке данных 2016–2020 гг. около 30% исследованных облаков имели характерные признаки зеркальных ОВЯ, что повторяет выводы статей [29, 120], основанные на результатах более ранних измерений в Томске. Кроме того, схожее заключение сделано иностранными коллегами для

Западной Сибири на основании данных исследовательского спутника CALIPSO [30]. Это подтверждает статистическую значимость полученной выборки и достоверность выводов, сделанных на основе её анализа.

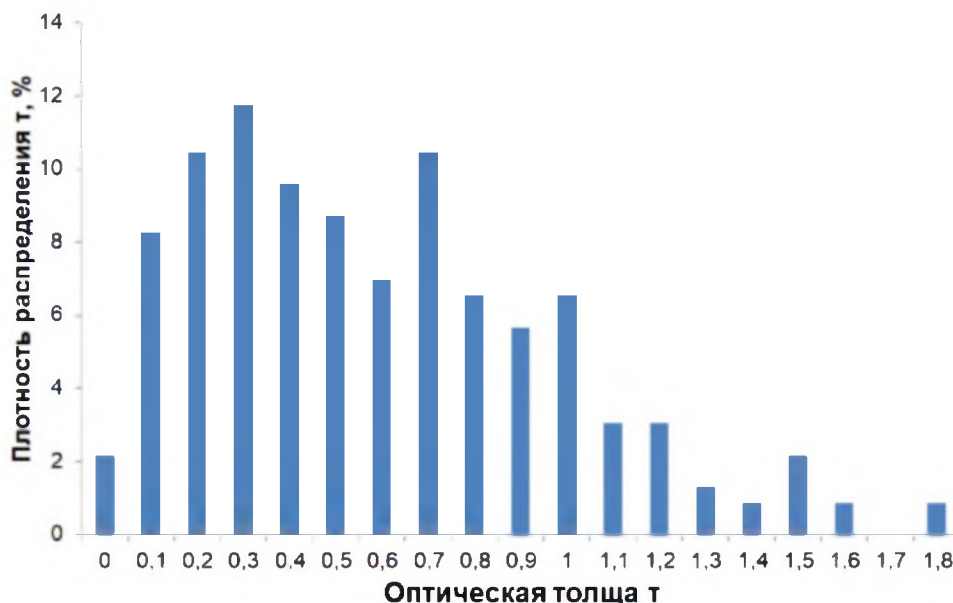


Рисунок 3.8 – Гистограмма распределения лидарной оптической толщи ОВЯ по данным зондирования на ВМПЛ НИ ТГУ в 2016–2020 гг.

На рисунках 3.9 и 3.10 приведены гистограммы распределений высот формирования зеркальных ОВЯ по данным лидарных измерений, а также соответствующих значений относительной влажности воздуха, температуры и точки росы по данным аэрологических измерений. Высоты формирования таких ОВЯ в 21% случаев составляла 6–7 км и в 58% случаев – 10–11 км.

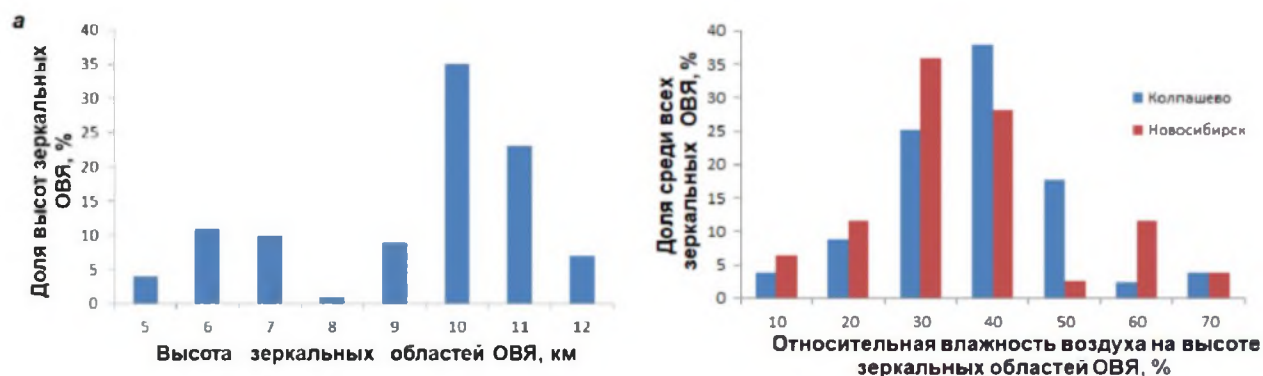


Рисунок 3.9 – Распределение высот регистрации ВМПЛ НИ ТГУ зеркальных ОВЯ (а) и соответствующие значения относительной влажности воздуха (б) по данным аэрологических измерений [27] (2016–2020 гг.) [174]

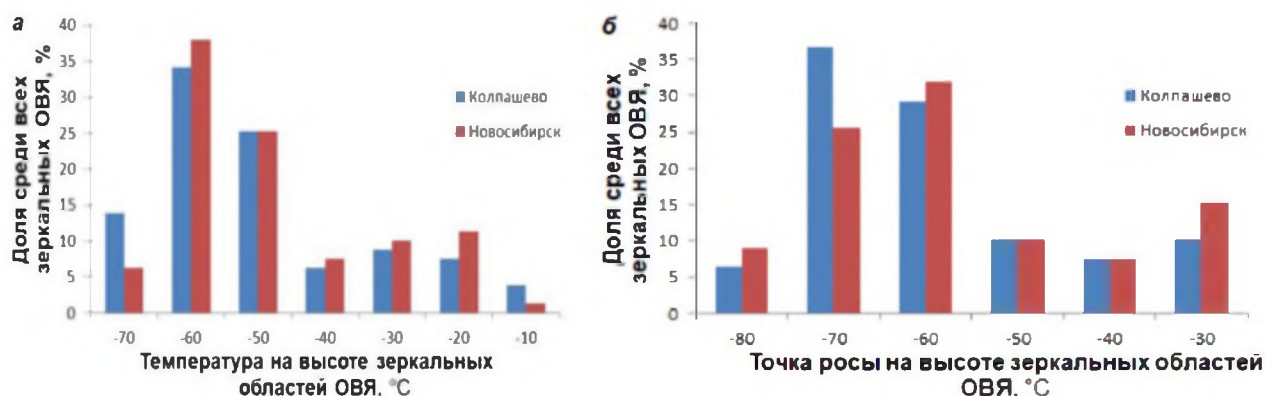


Рисунок 3.10 – Распределение температуры (а) и точки росы (б) на высотах регистрации ВМПЛ зеркальных ОВЯ по данным [27] аэрологических измерений (2016–2020 гг.) [174]

В качестве источников метеоданных использованы ближайшие к Томску аэрологические станции, расположенные в Колпашево и Новосибирске (см. п.2.5). Наиболее часто зеркальные ОВЯ наблюдались при значениях температуры и точки росы  $-60\dots-50^{\circ}\text{C}$  и  $-70\dots-60^{\circ}\text{C}$  соответственно, а также при относительной влажности воздуха 30–40%.

### 3.3 Оптические характеристики конденсационных следов самолётов по данным лидарных и аэрологических измерений

В п.2.6 описана методика идентификации самолётных следов на основе совместного анализа результатов лидарных и аэрологических измерений, а также траекторий полётов самолётов. Рассмотрим результаты двухдневного лидарного эксперимента 8–9.01.2018 г. по зондированию конденсационных следов самолётов. В течение этих двух дней между городами Томск и Юрга (Кемеровская область, около 80 км к Югу от Томска) пролетело около 120 самолётов [28]. Их траектории представлены на рисунке 3.11, а гистограмма распределения высот полётов – на рисунке 3.12. Подавляющее большинство самолётов летели на высотах 10,2 и 11,4 км. Это характерные высоты для самолётов, пролетающих в радиусе 100 км от Томска.



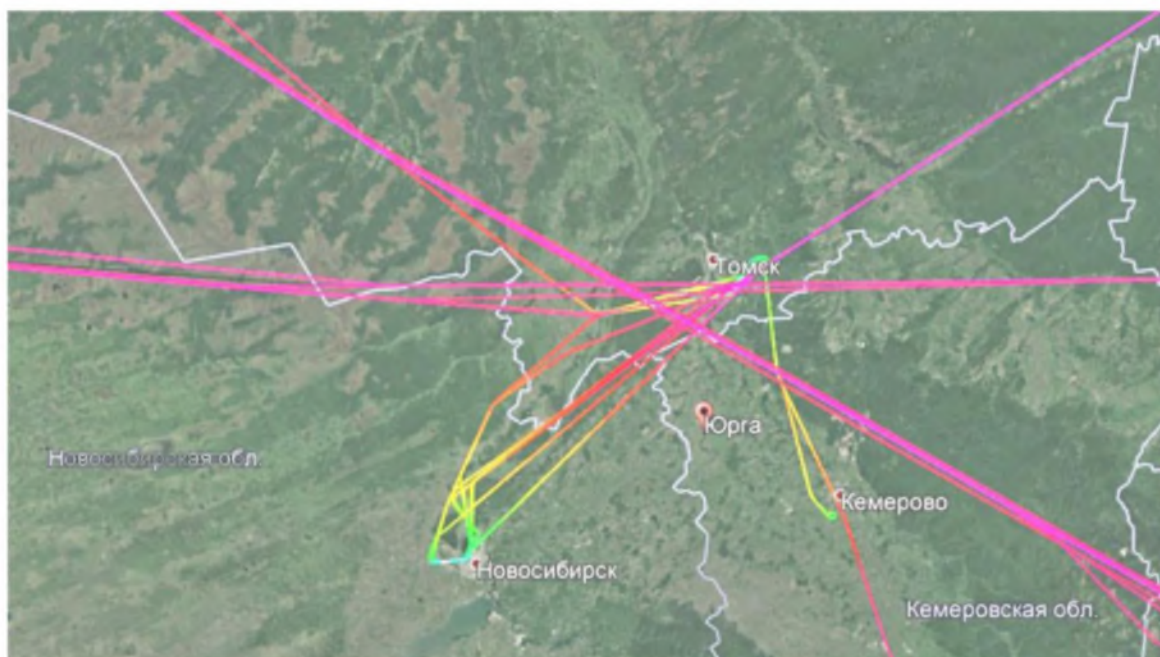


Рисунок 3.11 – Траектории полётов самолётов между Томском и Юргой 8–9.01.2018 г. [28]; изображение получено с применением геоинформационной системы Google Earth



Рисунок 3.12 – Распределение высот полётов самолётов в радиусе 100 км от Томска 8–9.01.2018 г. по данным сайта [28]

Как видно из рисунка 3.13, в течение обоих дней эксперимента ветер на этих высотах дул с Запада, что обеспечивало дрейф самолётных следов к Томску (аналогично п.2.5, здесь используется метеорологическое определение направления ветра, показывающее, откуда он дует). Представленные на рисунке 3.14 значения направления ветра в Колпашево, Новосибирске и Томске

по данным реанализа ERA-Interim [176] Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) подтверждают западное направление ветра на высоте 10 км в рассматриваемые дни.

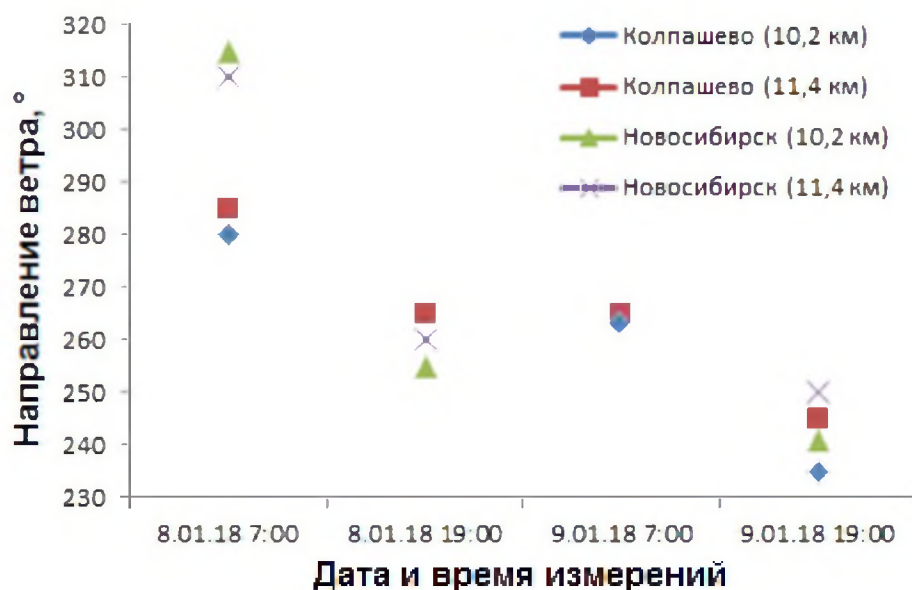


Рисунок 3.13 – Направление ветра 8–9.01.2018 г. на высотах 10,2 и 11,4 км по данным аэрологических измерений [27]; указано Томское время (UTC+7)

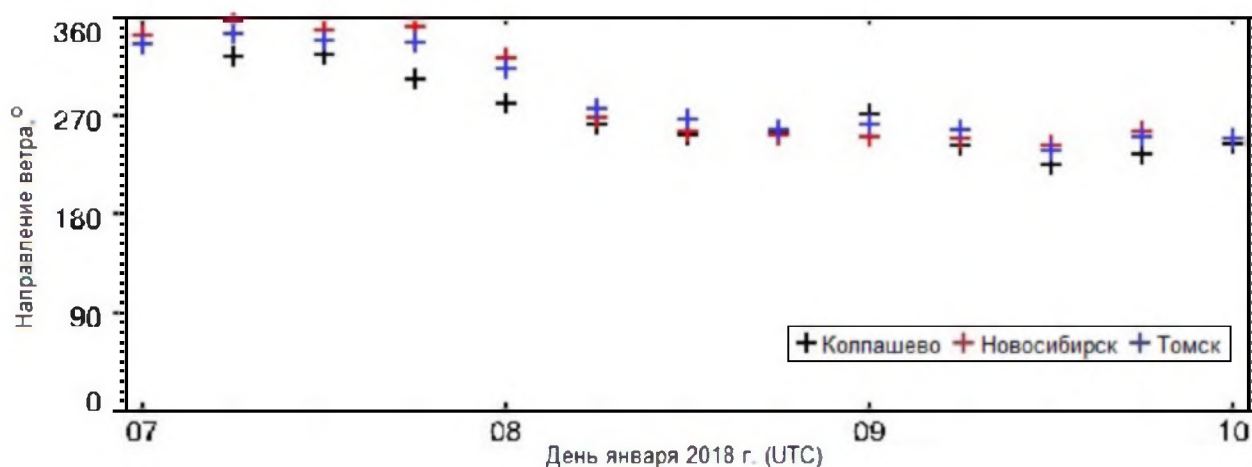
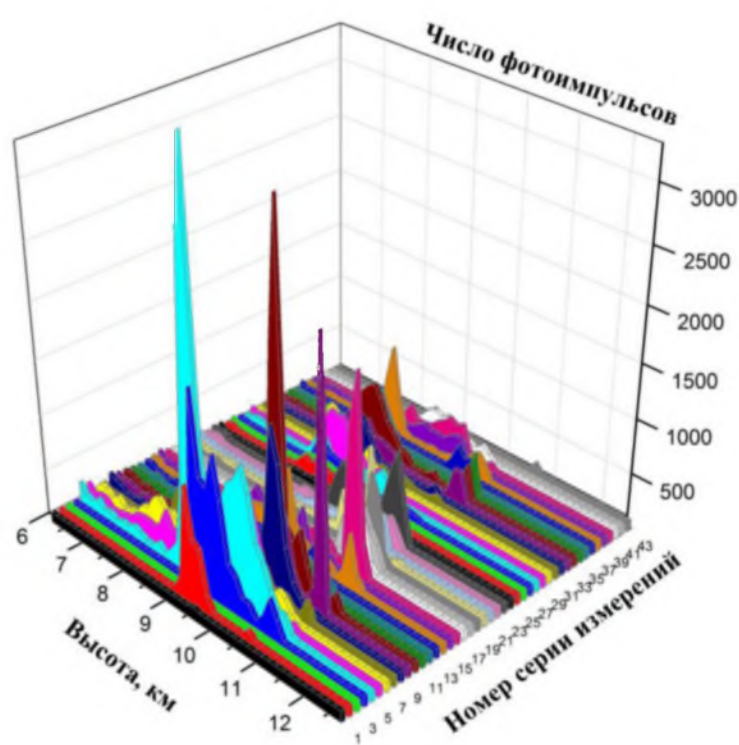


Рисунок 3.14 – Направление ветра 7–10.01.2018 г. на высоте 10 км по данным реанализа ERA-Interim [162, 176]; указано время UTC

Лидарные измерения начались 8 января 2018 г. в 11:20 в условиях дневного неба, приостановились в 12:12 по причине наступления безоблачной обстановки, и продолжились в 13:16. Следующий перерыв 9 января с 6:21 до 6:55 был вызван техническими причинами. Наконец, третий перерыв с 12:00 до 14:19 вызван с отсутствием облаков в поле зрения лидара. Затем измерения

продолжались с 14:19 до 15:21, завершившись серией, выполненной с 16:16 до 16:33 в условиях безоблачного неба. На рисунке 3.15 приведена временная последовательность вертикальных профилей интенсивности лидарного сигнала по данным обоих дней эксперимента, которая характеризует динамику изменчивости оптических и геометрических характеристик ОВЯ над лидаром. В таблице на рисунке указаны номер серии измерений и время регистрации соответствующего профиля. Из рисунка видно, что геометрические характеристики (высоты нижней и верхней границ, вертикальная мощность) и оптическая толщина облаков в вертикальном направлении существенно варьировались в течение измерений. Обращает на себя внимание как практически непрерывное наличие перистой облачности, так и наличие зеркальных облаков в течение первых серий измерений [177]. Диапазоны высот зарегистрированных ВМПЛ НИ ТГУ облаков представлены на рисунке 3.16.



№ серии	Дата и время (2018 г.)	№ серии	Дата и время (2018 г.)
1	8 янв., 11:20–11:37	23	9 янв., 00:09–00:42
2	8 янв., 11:37–11:54	24	9 янв., 00:43–01:16
3	8 янв., 11:56–12:12	25	9 янв., 01:16–01:50
4	8 янв., 13:16–13:32	26	9 янв., 01:50–02:24
5	8 янв., 13:36–14:10	27	9 янв., 02:25–02:58
6	8 янв., 14:10–14:43	28	9 янв., 02:58–03:31
7	8 янв., 14:43–15:17	29	9 янв., 03:32–04:05
8	8 янв., 15:20–15:53	30	9 янв., 04:06–04:39
9	8 янв., 15:55–16:29	31	9 янв., 04:40–05:14
10	8 янв., 16:33–17:07	32	9 янв., 05:14–05:47
11	8 янв., 17:15–17:48	33	9 янв., 05:48–06:21
12	8 янв., 17:48–18:22	34	9 янв., 06:55–07:29
13	8 янв., 18:22–18:55	35	9 янв., 07:29–08:02
14	8 янв., 18:56–19:29	36	9 янв., 08:03–08:36
15	8 янв., 19:29–20:03	37	9 янв., 08:36–09:10
16	8 янв., 20:06–20:39	38	9 янв., 09:10–09:44
17	8 янв., 20:39–21:12	39	9 янв., 09:44–10:17
18	8 янв., 21:13–21:46	40	9 янв., 10:18–10:51
19	8 янв., 21:50–22:23	41	9 янв., 10:52–11:25
20	8 янв., 22:23–22:57	42	9 янв., 11:26–12:00
21	8 янв., 23:00–23:33	43	9 янв., 14:19–14:36
22	8 янв., 23:35–00:09	44	9 янв., 14:41–14:58

Рисунок 3.15 – Временная последовательность вертикальных профилей интенсивности лидарного сигнала от ОВЯ, зарегистрированных в лидарных измерениях 8–9.01.2018 г. [177]





Рисунок 3.16 – Диапазоны высот ОВЯ, зарегистрированных лидаром НИ ТГУ  
8–9.01.2018 г.

В таблице 3.4 приведены примеры результатов оценки параметров дрейфа самолётных следов к месту расположения лидара НИ ТГУ. Напомним, методика этой оценки описана в п.2.6 и основана на предположении, что параметры ветра остаются постоянными в течение дрейфа самолётных следов к лидару. С учётом этого расхождение представленного в таблице рассчитанного и реального времени появления следа над лидаром, не превышающее 10 минут, представляется не критичным. На рисунке 3.17 в качестве примера представлена временная динамика вертикального профиля интенсивности лидарного сигнала, полученная в течение серии измерений, выполненной 9 января 2018 г. с 6:55 по 7:29, в течение которой зарегистрировано появление самолётного следа над лидаром. Время появления (отмечено на рисунке вертикальной белой линией) и высота соответствует самолёту, пролетевшему рейсом СХ289 (см. таблицу 3.4).

Рисунки 3.18 и 3.19 иллюстрируют временную динамику величин отношения рассеяния  $R$ , оптической толщины  $\tau$  и элемента МОРС  $m_{44}$  ОВЯ, полученных на основе данных лидарного зондирования. Обращает на себя внимание частая регистрация ледяных частиц с преимущественной горизонтальной ориентацией.

Таблица 3.4 – Примеры результатов совместного анализа лидарных, траекторных [28] и аэрологических данных [27] 8–9.01.2018 г.

Параметр	Значение					
Лидарные данные						
Диапазон высот, км	10,6–10,7	10,9–11,0	10,4–10,9	10,1–10,4	10,0–10,4	10,6–10,9
Дата и время появления над лидаром	8 янв. 13:21	8 янв. 16:25	8 янв. 18:40	8 янв. 23:13	9 янв. 07:05	9 янв. 14:45
Траекторные данные						
Рейс	CZ307	CX279	AZ759	Y87480	CX289	RU9014
Высота полёта, км	11	11,6	11,3	10,7	10,4	10,7
Аэрологические данные (Колпашево)						
Дата и время измерений	8 янв. 7:00	8 янв. 19:00	8 янв. 19:00	8 янв. 19:00	9 янв. 7:00	9 янв. 7:00
Высота измерения метеоданных*, км	11,0	11,7	11,4	10,7	10,3	10,3
Направление ветра**, °	285	266	265	260	265	265
Скорость ветра, м/с	21,09	19,03	20,06	25,2	21,09	21,09
Параметры дрейфа самолётных следов к месту расположения лидара НИ ТГУ						
Азимут***, °	281,1	280	269,5	263,6	270	261
Дистанция, км	93,8	88,8	59,1	50,4	60,2	45,1
Длительность, мин	74	77	49	33	47	35
Расчитанные дата и время появления над лидаром	8 янв. 13:11	8 янв. 16:24	8 янв. 18:45	8 янв. 23:08	9 янв. 07:01	9 янв. 14:43

\*Выбрано значение, наиболее близкое к высоте полёта самолёта из соответствующих метеорологических данных; \*\*указано метеорологическое направление ветра (см. п.2.5);

\*\*\*азимут от точки траектории полёта самолёта на место расположения ВМПЛ НИ ТГУ.

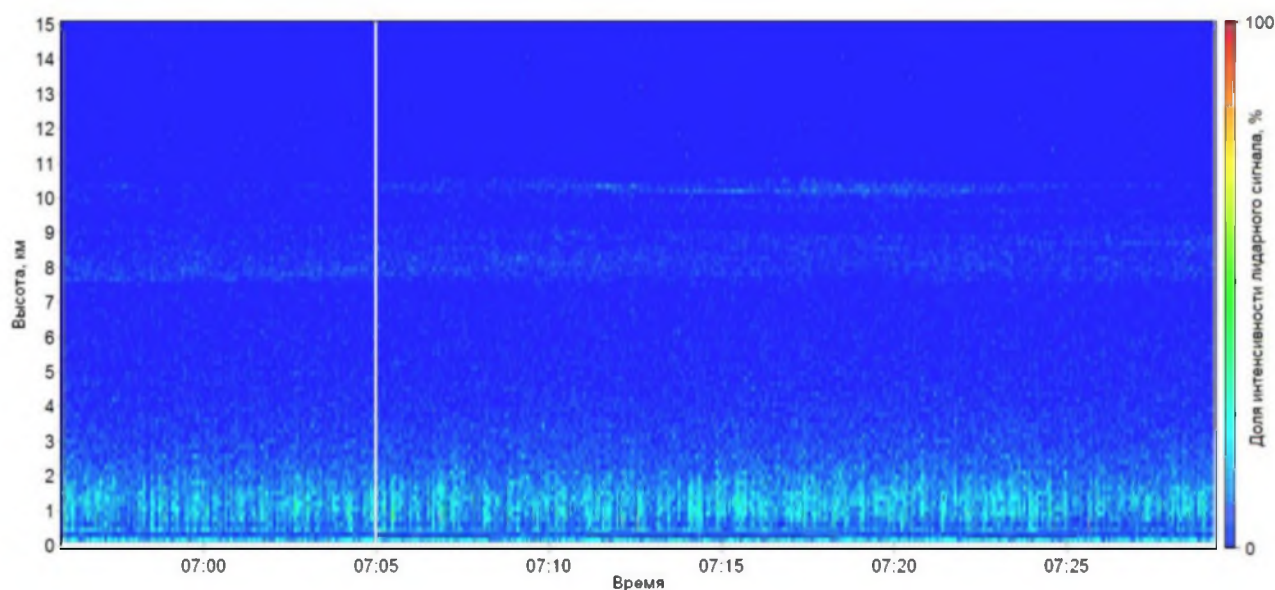


Рисунок 3.17 – Временная динамика вертикального профиля интенсивности лидарного сигнала (9.01.2018 г. 6:55–7:29); вертикальной линией обозначен момент начала регистрации самолётного следа на высотах 10,1–10,7 км

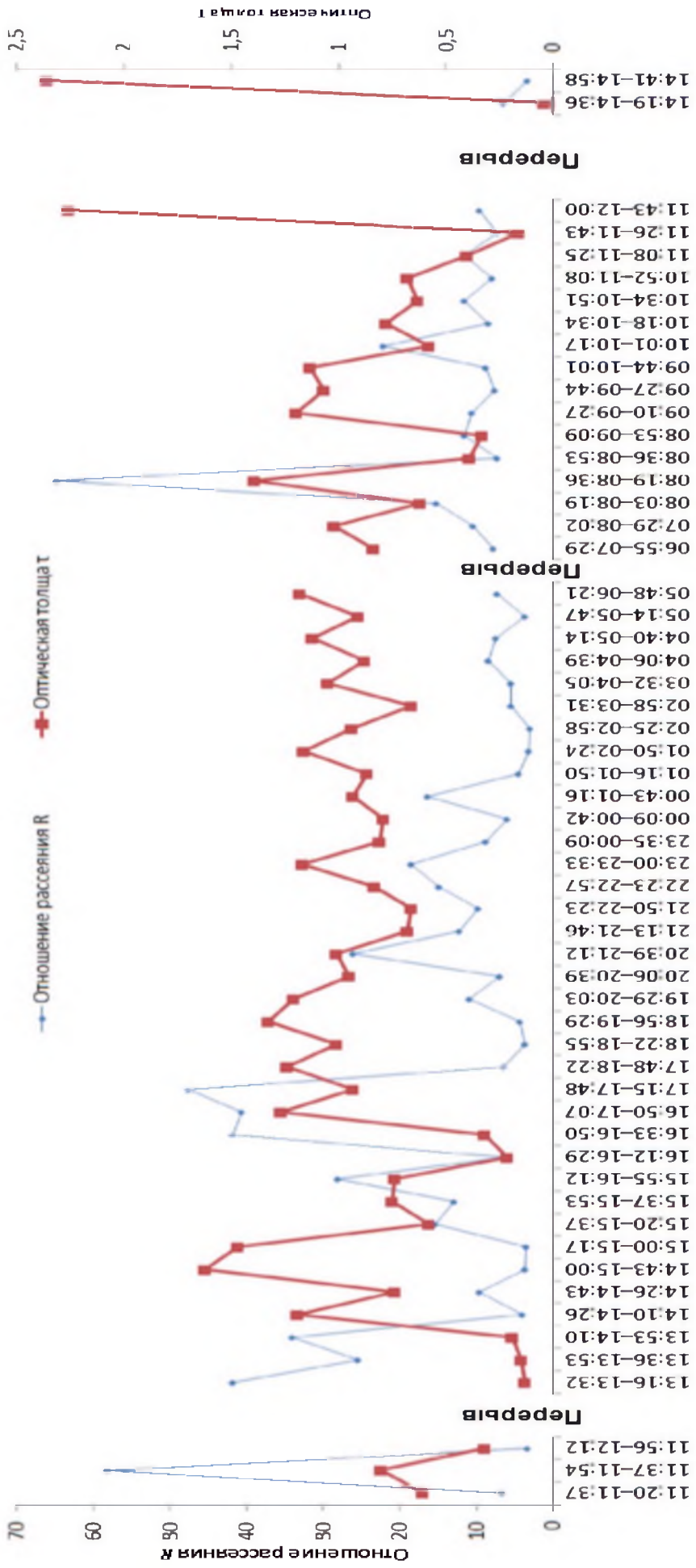


Рисунок 3.18 – Временная динамика отношения рассеяния  $R$  и оптической толщины  $\tau$  ОВЯ по данным лидарного эксперимента 8–9.01.2018 г.

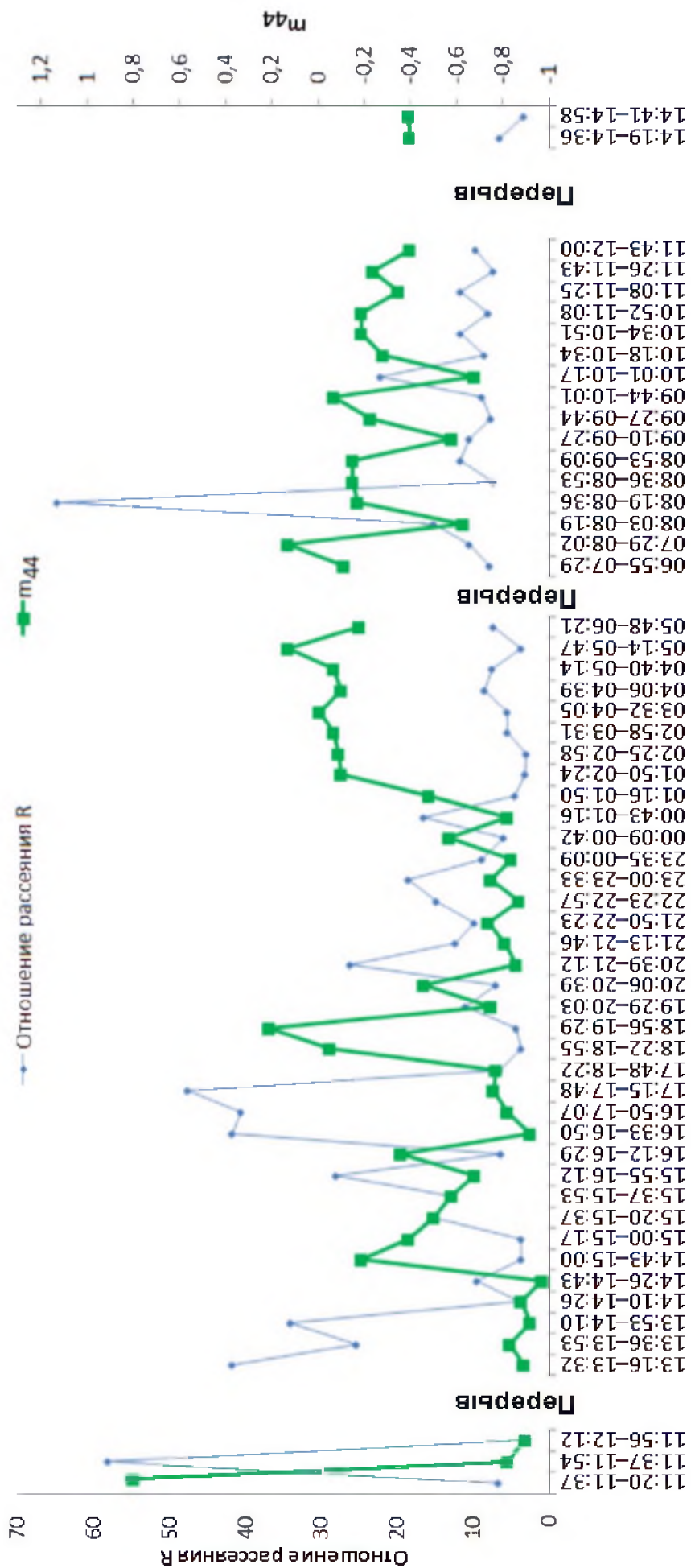


Рисунок 3.19 – Временная динамика отношения рассеяния  $R$  и элемента  $m_{44}$  МОРС ОВЯ по данным лидарного эксперимента 8–9.01.2018 г.

С целью интерпретации лидарных данных в работе реализована круглосуточная запись (с августа 2019 г.) траекторий полётов самолётов в радиусе 100 км от Томска. На основе анализа рассматриваемого пятилетнего массива данных лидарных экспериментов, установлено, что наиболее часто зеркальные ОВЯ регистрировались лидаром на высотах 10–11 км, а также 6–7 км. На них расположено большинство трасс регулярного авиасообщения в радиусе 100 км от Томска – до пандемии COVID-19 здесь пролетало, в среднем, около 200 самолётов в сутки [28]. Гистограмма на рисунке 3.20 наглядно демонстрирует почти двукратное сокращение плотности полётов на фоне пандемии коронавирусной инфекции COVID-19 и связанного с ней повсеместного введения ограничительных мер. Отметим, что считаем преждевременным возможный вывод из рисунка о связи повторяемости зеркальных ОВЯ и авиатрафика на высотах их формирования, поскольку временной масштаб накопленного массива траекторий самолётов значительно меньше массива лидарных данных.

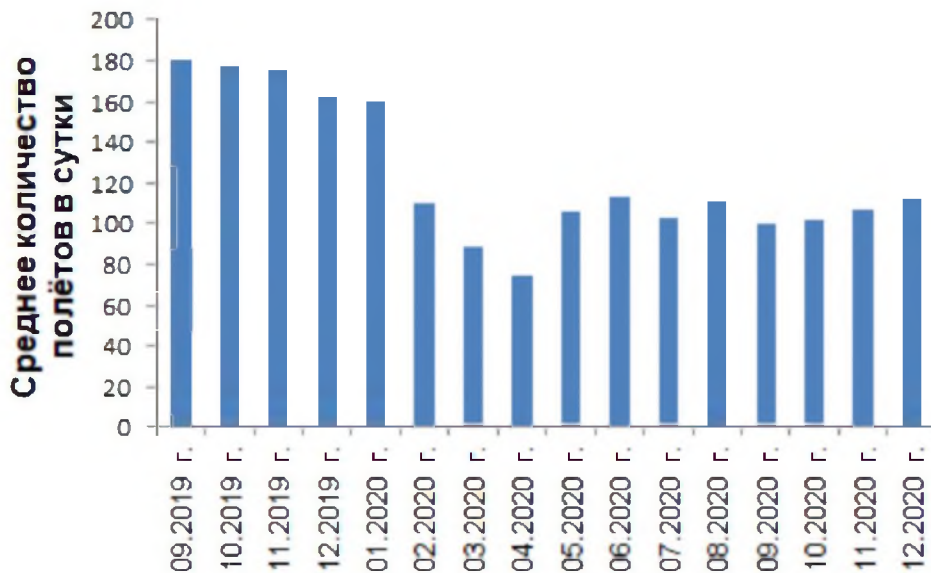


Рисунок 3.20 – Распределение среднего количества полётов самолётов в радиусе 100 км от Томска в сентябре 2019 г. – декабре 2020 г. по данным ADS-B мониторинга [28]



На рисунке 3.21 приведено распределение количества полётов, а также количества случаев дрейфа самолётных следов в направлении Томска, оценённого на основе расчётов его параметров для каждого зарегистрированного самолёта. Средняя доля случаев дрейфа самолётных следов в направлении лидара НИ ТГУ от общего количества полётов за период с августа 2019 г. по декабрь 2020 г. составила 61%. При этом, несмотря на сокращение плотности авиационного трафика, начавшееся в феврале 2020 г. (см. рисунки 3.20 и 3.21) вследствие антикоронавирусных ограничений, доля случаев такого дрейфа следов превышала половину в течение всего рассматриваемого периода и даже достигла 76% в апреле. Отметим, что представленные значения получены с учётом взаимного расположения точек траекторий полётов самолётов и лидара, а также направления ветра. Остальные метеорологические величины и длительность существования самолётных следов при этом не учитывались. На рисунке 3.22 представлено распределение количества зарегистрированных ВМПЛ самолётных следов и зеркальных среди них в период с сентября 2019 г. по сентябрь 2020 г.

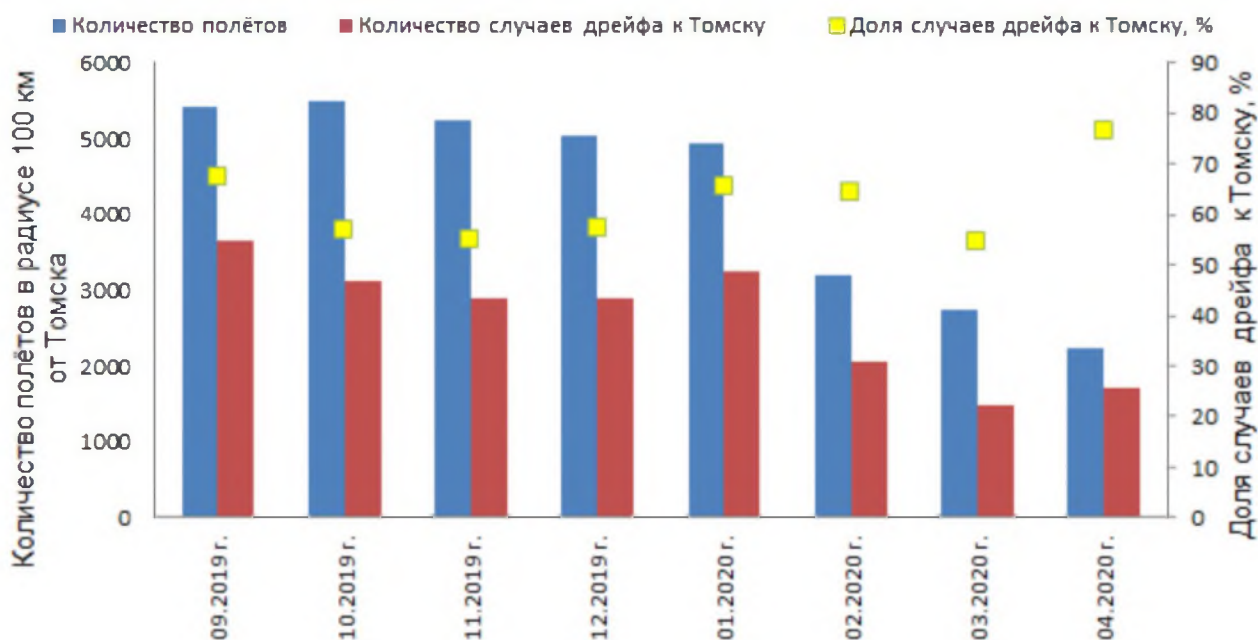


Рисунок 3.21 – Распределение количества полётов [28] в радиусе 100 км вокруг Томска и количества случаев дрейфа следов самолётов к Томску

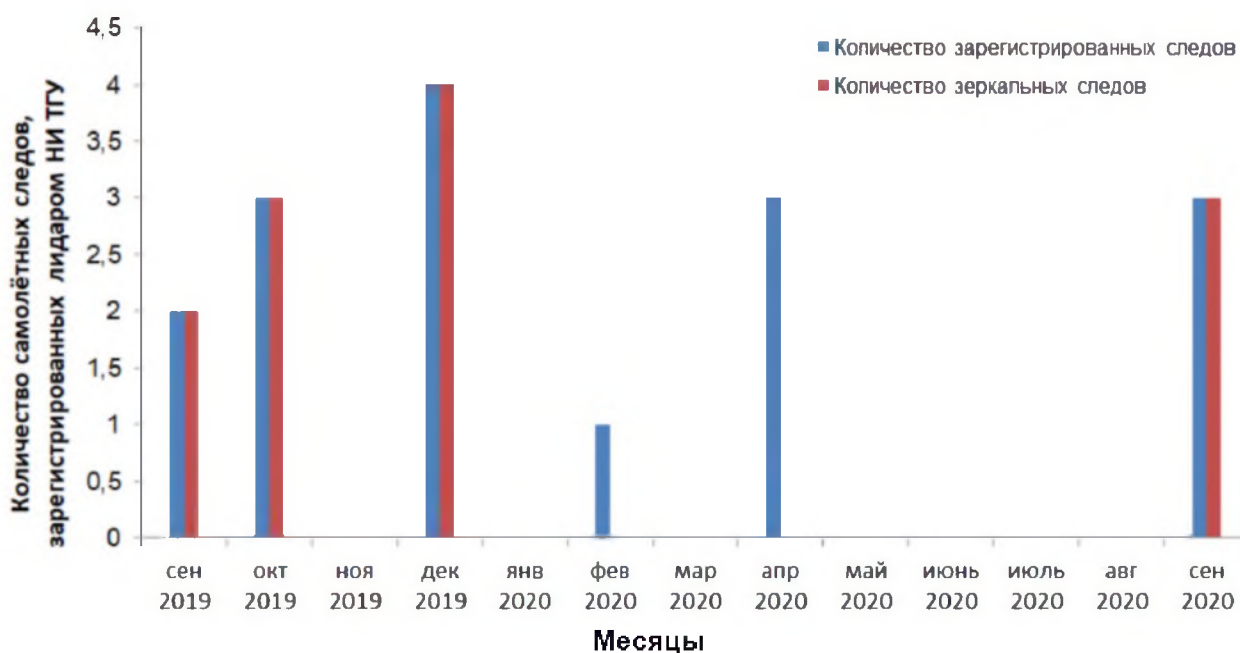


Рисунок 3.22 – Распределение количества самолётных следов, зарегистрированных лидаром НИ ТГУ, и количества зеркальных среди них

Как видно из рисунка 3.22, в течение нескольких месяцев рассматриваемого периода самолётные следы не регистрировались в лидарных экспериментах. Кроме того, в течение двух месяцев ни один из зарегистрированных лидаром следов не был зеркальным. Следует отметить, что на протяжении рассматриваемого периода проведению лидарных экспериментов по зондированию перистых облаков часто препятствовали кучевая облачность и облака нижнего и среднего ярусов, а в условиях, благоприятных для зондирования, нередко отсутствовали ОВЯ. Кроме того, как отмечалось выше, начиная с февраля 2020 г. авиационный трафик резко снизился с противоковидными ограничениями. Тем не менее, в течение рассматриваемого периода было зарегистрировано 16 самолётных следа, из которых 75% имели свойства зеркальных. Диапазон их высот составил 7–12 км.

На высотах формирования зеркальных конденсационных следов самолётов температура воздуха принимала значения от  $-67$  до  $-52^{\circ}\text{C}$ , точка росы – от  $-77$  до  $-61^{\circ}\text{C}$ , а относительная влажность воздуха – от 22 до 50%. Длительность существования этих следов от момента выхлопа к моменту регистрации лидаром НИ ТГУ составило от 12 минут до 1 часа 58 минут. Во

время регистрации самолётных следов без проявления зеркальных свойств температура воздуха на соответствующих высотах менялась от  $-50$  до  $-36^{\circ}\text{C}$ , точка росы – от  $-56$  до  $-44^{\circ}\text{C}$ , относительная влажность воздуха – от 40 до 57%, а время существования следов к моменту регистрации – от 50 минут до 1 часа 45 минут.

### **3.4 Влияние зеркальных облаков верхнего яруса на потоки рассеянной солнечной радиации в околозенитной области**

Как отмечалось в п.2.7, совместный анализ данных ВМПЛ НИ ТГУ и Z-пиранометра ИМКЭС СО РАН требует введения единой временной шкалы, поскольку они разнесены друг от друга на расстояние 6 км (см. рисунок 2.10) и потому аэрозольному образованию, попадающему в поле зрения одного инструмента, требуется время для достижения места расположения второго под действием ветра. При этом длительность такого дрейфа может принимать различные значения, поскольку зависит от направления и скорости ветра на высотах формирования конкретного аэрозольного образования.

Солнечная радиация, чей поток измеряется в приземном слое атмосферы, состоит из прямой и рассеянной компонент. Вторая формируется в результате рассеяния прямой радиации атмосферными газами, водяными каплями облаков и туманов, ледяными кристаллами облаков и твёрдыми частицами аэрозолей. Более 99% всей приходящей прямой и рассеянной солнечной радиации сосредоточено в коротковолновой области спектра от 300 до 4000 нм [166]. Величина рассеянной радиации определяется прозрачностью атмосферы при отсутствии облаков, а также оптическими свойствами и количеством облаков в условиях облачной атмосферы (в первую очередь, в околозенитной зоне). Доля рассеянной радиации в суммарной при ясном небе в среднем составляет примерно 15–20% как для тёплого, так и для холодного периодов [178]. Перистая облачность, ввиду её значительной высоты над точкой измерения, в меньшей степени влияет на поток рассеянной радиации, чем другие формы облачности. Исключение может составлять перисто-



слоистая облачность  $C_s$ , при которой почти вся измеряемая стандартным способом рассеянная радиация поступает со стороны солнечного диска, создающего вокруг себя ореол большого размера [177].

В работе использовался оригинальный способ относительной оценки потоков рассеянного излучения, описанный в статье [179]. Конструктивно Z-пиранометр представлял собой стандартный прибор М-115М, помещённый в трубу диаметром 110 мм, высота которой определяла поле зрения в околоразенитном направлении в пределах  $\pm 30^\circ$ . Такая конструкция полностью исключает влияние прямой радиации и большей части рассеянной, поступающей из околосолнечной зоны (для рассмотренного далее дня 28.05.2017 г. зенитный угол Солнца в полдень для широты Томска составлял около  $37,7^\circ$ ). Отметим, что в рамках решаемой задачи не преследовалась цель определения абсолютного значения потока рассеянного излучения. Вместо этого анализировалось относительное изменение потока рассеянной радиации в моменты регистрации лидаром зеркальных и незеркальных локальных областей ОВЯ [177].

Для приведения лидарно-пиранометрических данных эксперимента 28.05.2017 г. к единой временной шкале (методика описана в п.2.7) рассчитывались координаты условной точки. На рисунке 3.23 представлено её расположение относительно лидара НИ ТГУ и пиранометра ИМКЭС СО РАН. Лидарные измерения выполнялись в светлое время суток, поэтому для оценки характеристик ветра использовались результаты аэрологических измерений (см. п.2.5), выполненных утром и вечером дня эксперимента. Данные вечерних измерений станции Колпашево 28.05.2017 г, доступны [27] только для высот 0–2 км, поэтому для оценки параметров дрейфа ОВЯ использовалось среднее значение направления и скорости ветра по данным утренних и вечерних измерений станции Новосибирска.

Средняя высота ОВЯ, зарегистрированных в течение лидарных измерений около полудня, составила 6,6 км – это значение использовалось для оценки характеристик ветра. Среднее направление и скорость ветра были

равны  $232^\circ$  и 15 м/с, соответственно. Оценённая условная дистанция дрейфа (расстояние от рассчитанной условной точки до точки расположения Z-пиранометра) составила 5,8 км, длительность – 6 минут. Эта величина прибавлялась ко времени лидарных измерений для их приведения к единой временной шкале с данными Z-пиранометра. Для удобства всюду будем оперировать временем в точке расположения Z-пиранометра.

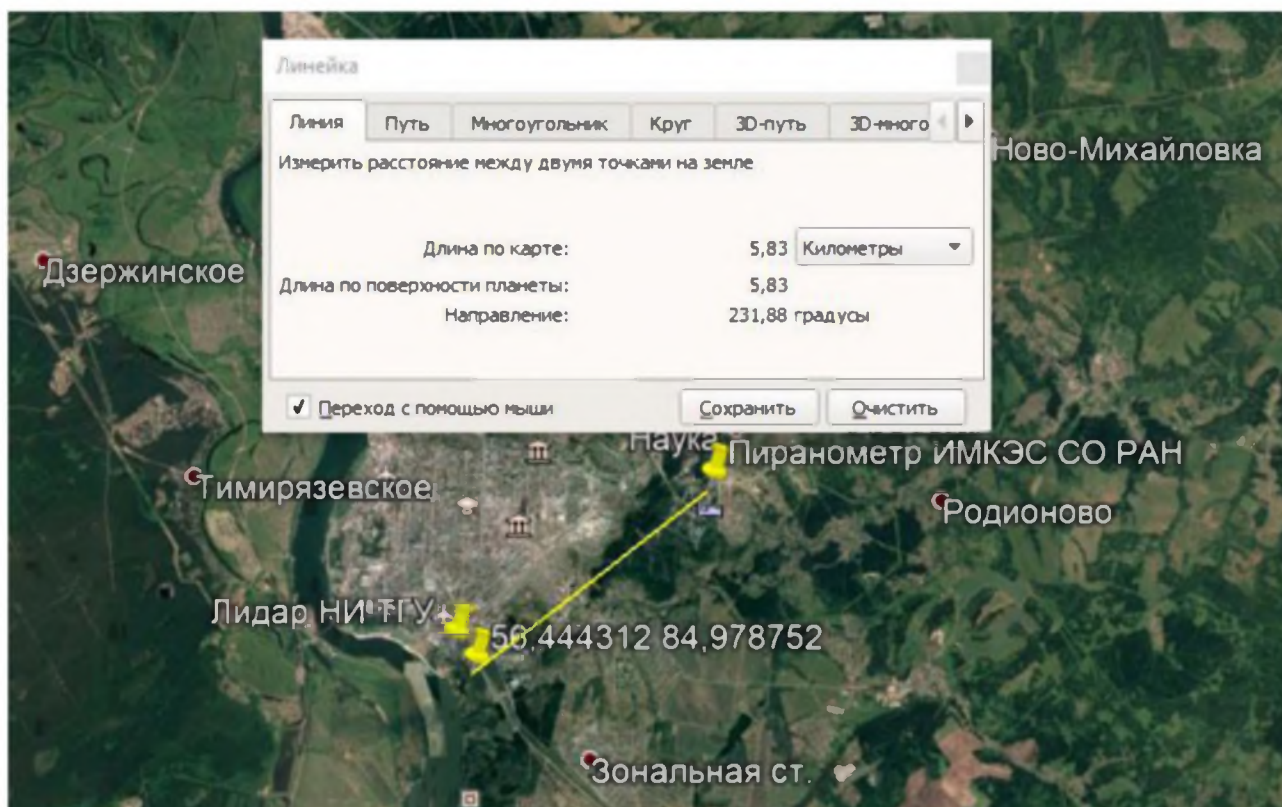


Рисунок 3.23 – Расположение лидара, Z-пиранометра и условной точки (28.05.2017 г.) [177]; изображение получено в геоинформационной системе Google Earth

На рисунке 3.24 представлен поток рассеянной солнечной радиации по данным Z-пиранометра (показания – выходное напряжение в мВ). Моменты начала и завершения интервалов времени, в течение которых лидаром регистрировались зеркальные и незеркальные области ОВЯ, обозначены вертикальными линиями. Для простоты различия этих интервалов будем использовать их буквенное обозначение. Интервалы отсутствия регистрации ОВЯ лидаром исключены из рассмотрения. Оптические характеристики локальных частей облаков, зарегистрированных в течение каждого из

приведённых интервалов, приведены в таблице 3.5. Для оценки оптических характеристик локальных частей исследуемых облаков лидарные сигналы суммировались по указанным интервалам и анализировались как полученные в течение отдельных серий измерений [177].

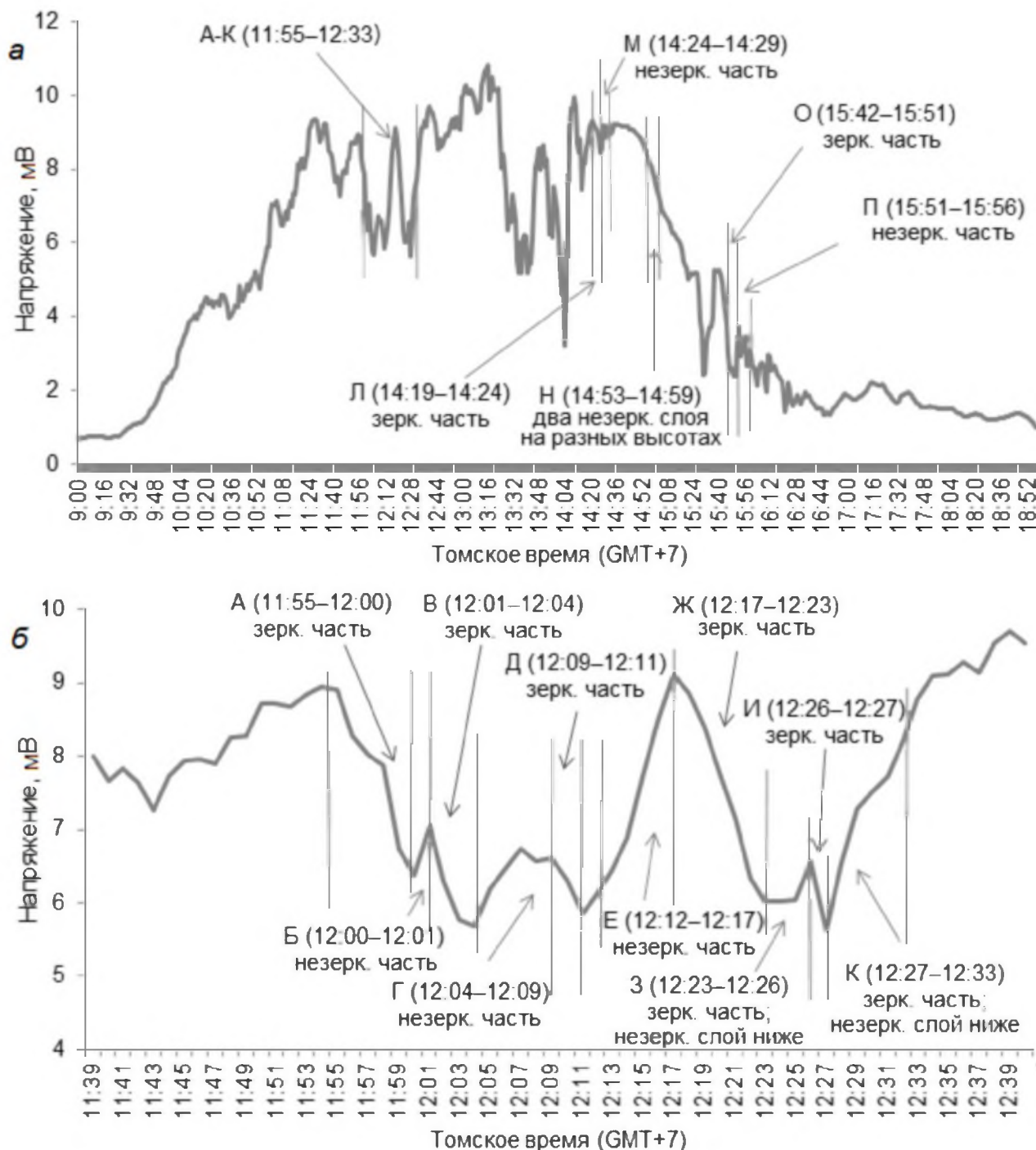


Рисунок 3.24 – Поток рассеянной солнечной радиации в течение дня 28.05.2017 г. по данным Z-пиранометра: *а* – в течение светлого времени суток, *б* – для интервалов времени А–К [177]

В период с 11:55 по 12:33 было выполнено две серии лидарных измерений, каждая длительностью по 16 минут 40 секунд. На рисунке 3.25 представлена временная динамика вертикального профиля интенсивности лидарного сигнала, полученная в течение каждой серии. Как следует из анализа данных в таблице 3.5, исследуемое облако состояло из чередующихся зеркальных и незеркальных областей – этот интервал более подробно представлен на рисунке 3.24б.

На рисунке 3.25 вертикальными линиями обозначены границы интервалов. Цвета точек на графиках характеризуют интенсивности лидарного сигнала, зарегистрированного для соответствующей высоты в соответствующее время. Чёрный цвет соответствует минимальной интенсивности, а оттенки серого тем ближе к белому, чем ближе интенсивность к максимальной, зарегистрированной в течение рассматриваемой серии лидарных измерений.

Таблица 3.5 – Оптические характеристики исследуемых ОВЯ  
(28.05.2017 г.) [177]

Временной интервал	Отношение рассеяния $R$	Оптическая толщина $\tau$	Элемент $m_{44}$ МОРС	Описание
А (11:55–12:00)	13,32	0,01	–0,81	Зеркальная часть
Б (12:00–12:01)	7,6	0,58	–0,44	Незеркальная часть
В (12:01–12:04)	22,4	0,25	–0,98	Зеркальная часть
Г (12:04–12:09)	6,75	0,36	–0,38	Незеркальная часть
Д (12:09–12:11)	17,91	0,32	–0,48	Зеркальная часть
Е (12:12–12:17)	4,36	0,62	–0,37	Незеркальная часть
Ж (12:17–12:23)	25,7	0,02	–0,61	Зеркальная часть
З (12:23–12:26)	102,79	0,05	–0,64	Зеркальная часть; незеркальный слой ( $A_c \sim 3$ км)
И (12:26–12:27)	110,98	0,11	–0,69	Зеркальная часть
К (12:27–12:33)	85,05	0,48	–0,94	Зеркальная часть; незеркальный слой (12:27–12:29: $A_c$ 2,5–3,9 км; 12:29–12:33: $A_c \sim 2,7$ км)
Л (14:19–14:24)	62,82	0,05	–0,91	Зеркальная часть
М (14:24–14:29)	4,93	0,19	–0,35	Незеркальная часть
Н (14:53–14:59)	9,7	0,36	–0,83	Два незеркальных слоя ( $\sim 7,5$ и $\sim 11$ км)
О (15:42–15:51)	45,54	0,41	–0,84	Зеркальная часть
П (15:51–15:56)	8,89	1,61	–0,43	Незеркальная часть

Из рисунков 3.24б и таблицы 3.5 видно, что в течение интервалов времени, соответствующих регистрации лидаром зеркальных локальных областей ОВЯ (интервалы А, В, Д, Ж, И), поток рассеянной радиации в зените существенно (более 10%) уменьшается и, напротив, возрастает при появлении (по лидарным данным) незеркальных частей облака в околозенитной зоне [177].

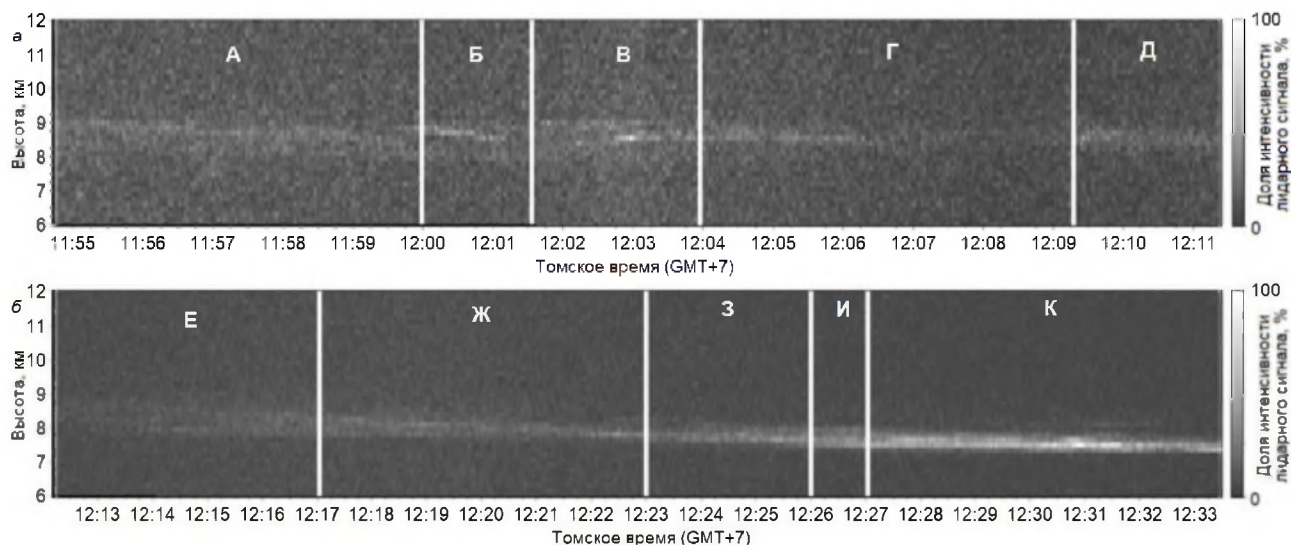


Рисунок 3.25 – Временная динамика вертикального профиля интенсивности лидарного сигнала (28.05.2017 г.): *а* – интервалы А–Д, *б* – интервалы Е–К [177]

Исключением являются интервалы З и К, в течение которых лидар регистрировал зеркальные части облака (на высоте 7,5 км) в околозенитной области. Строго говоря, зеркальность этого облака наблюдалась в течение интервалов Ж–К, однако одновременно с этим наблюдался незеркальный слой на высотах 3–4 км. О его наличии свидетельствуют всплески интенсивности лидарного сигнала на соответствующих высотах (представлены на рисунке 3.26). Малая их заметность связана с тем, что интенсивность сигнала от рассматриваемого перистого облака на высоте около 7,5 км на графиках значительно превышает таковую для высот среднего яруса [177].

Поскольку интервал З был примерно в два раза короче интервала К (три минуты против шести), второй из них разделён на рисунке 3.26 на две части – им соответствуют графики на рисунке 3.26б,в. Временная граница между этими частями соответствует времени увеличения угла наклона кривой потока рассеянной радиации (рисунок 3.24, 12:29). По всей видимости, это вызвано



уменьшением геометрической толщины (см. таблицу 3.5) и оптической толщи нижнего слоя с одновременным усилением зеркальных свойств ОВЯ [177].

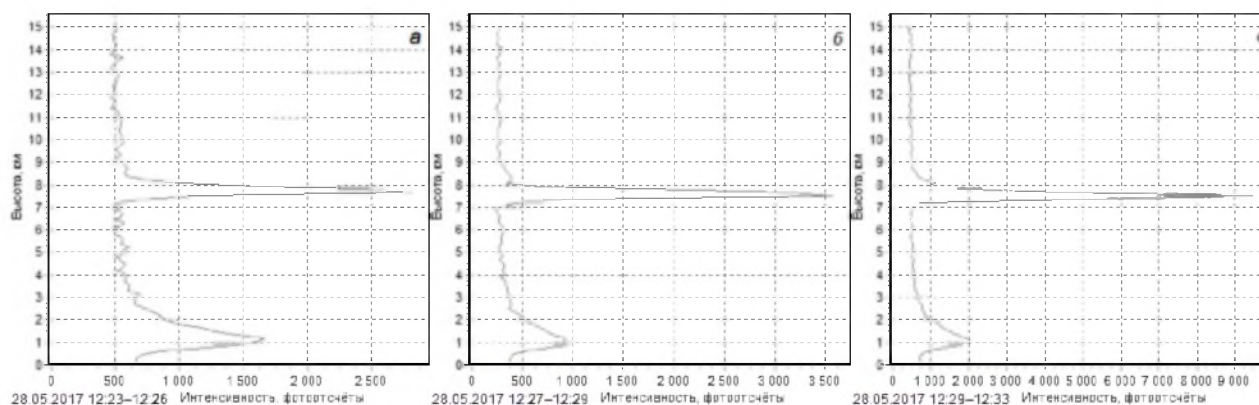


Рисунок 3.26 – Вертикальные профили лидарного сигнала (28.05.2017 г.): интервалы З (а) и К (б, в) [177]

Выводы, аналогичные сделанным для интервалов А–К, подтверждаются и по данным, полученным для интервалов Л–П. Так, наличие зеркальной локальной области ОВЯ приводит к уменьшению потока рассеянной солнечной радиации в зените, тем более резко, чем более ярко проявление зеркальных свойств. Этот эффект можно объяснить тем, что существенная доля падающей на зеркальную область облака прямой радиации отражается в космос. Появление в поле зрения пиранометра незеркальных облаков заметно увеличивает поток рассеянной радиации. При этом одновременная регистрация зеркальных частей ОВЯ и незеркальных облаков среднего яруса приводит к более заметному увеличению этой величины, что можно объяснить преимущественным влиянием более низких облаков [177].

Рассмотрим данные другого лидарно-пиранометрического эксперимента, выполненного 7 сентября 2017 г.. Как и для рассмотренного выше, результаты приведены к единой временной шкале. Высоты облаков и характеристики ветра оценивались по данным лидарных и аэрологических измерений соответственно. На рисунке 3.27 представлена динамика сигнала Z-пиранометра.

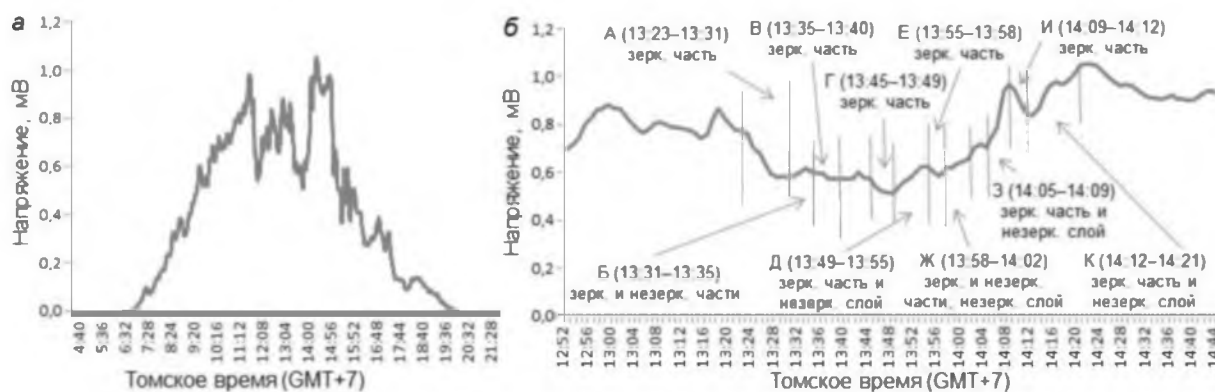


Рисунок 3.27 – Дневной ход сигнала Z-пиранометра (7.09.2017 г.): *a* – в светлое время суток, *б* – для интервалов времени А–К [180]

Оптические характеристики участков ОВЯ, зарегистрированных в течение каждого из интервалов, приведены в таблице 3.6. Как следует из таблицы, зарегистрированное облако было зеркальным, однако в течение нескольких интервалов расслаивалось, выделяя незеркальную часть. Кроме того, несколько раз одновременно с ним наблюдались незеркальные аэрозольные слои. На рисунке 3.28 представлена динамика вертикального профиля интенсивности лидарного сигнала.

Таблица 3.6 – Оптические характеристики ОВЯ (7.09.2017 г.) [180]

Временной интервал	Отношение рассеяния $R$	Оптическая толщина $\tau$	Элемент $m_{44}$ МОРС	Описание
А (13:23–13:31)	168,87	0,66	–0,94	Зеркальная часть
Б (13:31–13:35)	52,03	0,42	–0,87	Аэрозольный слой разделился на зерк. и незерк. части
В (13:35–13:40)	31,94	0,34	–0,86	Зеркальная часть
Г (13:45–13:49)	29,67	0,86	–0,79	Зеркальная часть
Д (13:49–13:55)	34,51	0,03	–0,8	Зеркальная часть и незеркальный слой
Е (13:55–13:58)	57,43	0,58	–0,77	Зеркальная часть
Ж (13:58–14:02)	84,65	0,34	–0,83	Аэрозольный слой разделился на зерк. и незерк. части; незеркальный слой
З (14:05–14:09)	38,86	0,68	–0,87	Зеркальная часть и незеркальный слой
И (14:09–14:12)	47,68	0,3	–0,8	Зеркальная часть
К (14:12–14:21)	102,85	0,24	–0,84	Зеркальная часть и незеркальный слой

Как и в данных ранее рассмотренного лидарно-актинометрического эксперимента, видно, что в течение интервалов времени, соответствующих

регистрации лидаром зеркальных локальных областей ОВЯ (А, В, Г, Е, а также И), поток рассеянной радиации в зените по данным Z-пиранометра уменьшался. При этом рост потока наблюдался во время интервалов, в течение которых регистрировались незеркальные части облака и/или незеркальные аэрозольные слои. Это позволяет заключить, что поток рассеянной радиации по данным Z-пиранометра увеличивается, когда зеркальная часть облака сменяется на незеркальную.

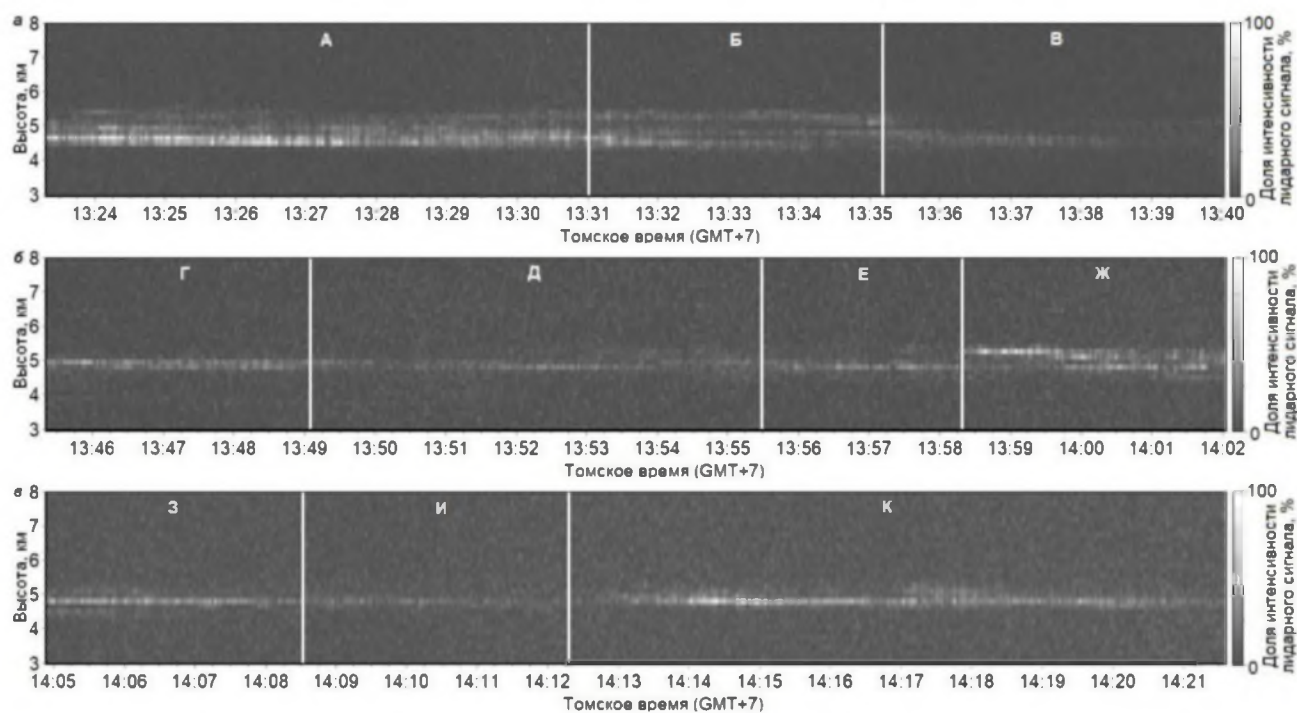


Рисунок 3.28 – Временная динамика вертикального профиля интенсивности лидарного сигнала (7.09.2017 г.): *а* – интервалы А–В, *б* – интервалы Г–Ж, *в* – интервалы З–К [180]

Эффект можно объяснить тем, что существенная доля падающей на зеркальную область облака прямой радиации отражается в космос. Наличие же незеркальных аэрозольных образований приводит к увеличению потока рассеянной радиации (либо она практически не изменяется). При этом одновременная регистрация зеркальных и незеркальных ОВЯ приводит к более заметному увеличению этой величины, что можно объяснить преимущественным влиянием на неё более низких облаков.



### Основные выводы по главе 3

В третьей главе рассмотрены результаты статистической обработки массива данных лидарных экспериментов 2016–2020 гг., полученного с использованием параллельного накопления лидарных сигналов. Показано, что около трети (30%) ОВЯ, зарегистрированных в течение указанного периода, имели характерные свойства облаков, состоящих из ледяных частиц с преимущественной горизонтальной пространственной ориентацией. Сделанные выводы согласуются с результатами других авторов для Сибирского региона, что подтверждает их достоверность.

Кроме того, показано, что зеркальность ОВЯ не является общей для всего облака, а может быть свойственна отдельным его локальным областям. При этом регистрация зеркальной области облака в течение части временного интервала серии измерений в большинстве случаев приводит к идентификации облака зеркальным на основе анализа данных, накопленных в течение всей серии. Отмеченный эффект наблюдается при регистрации в течение остальной части серии и незеркальных областей облака, и безоблачной атмосферы. В условиях Западной Сибири размеры зеркальных областей ОВЯ принимают значения от 4 до 30 км.

Накопленный в течение периода с сентября 2019 г. по сентябрь 2020 г. включительно массив траекторий полётов самолётов в радиусе 100 км от Томска и его анализ вместе с аэрологическими данными для соответствующих высот позволил заключить, что в течение рассматриваемого периода 75% из зарегистрированных лидаром самолётных следов имели свойства зеркальных.

В комплексных лидарно-актинометрических экспериментах показано, что зеркальные ОВЯ существенно уменьшают поток суммарной солнечной радиации. Указанный эффект широко наблюдается для ОВЯ не только естественного, но и антропогенного происхождения, что должно учитываться при разработке их микрофизических моделей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Облака верхнего яруса являются фактором, влияющим на формирование климата, учёт влияния которых на радиационный баланс атмосферы является важной нерешённой проблемой. Закономерности взаимодействия оптического излучения с такими облаками определяются параметрами их микроструктуры, такими как размеры, форма и пространственная ориентация ледяных кристаллов в них. Исследования микроструктуры облаков в полной мере контактными методами не представляется возможным ввиду нарушения пространственной ориентации ледяных кристаллов в них при заборе проб исследуемой среды. Оценка параметров микроструктуры ОВЯ возможна дистанционными методами, позволяющими оценить влияние облаков на состояние поляризации оптического излучения. Среди средств таких исследований, существующих в мире, уникальным является высотный матричный поляризационный лидар НИ ТГУ, поскольку он позволяет экспериментально получать полные матрицы обратного рассеяния света облаков. Кроме того, важным его преимуществом является высокое пространственное разрешение (от 37,5 до 150 м), а также возможность параллельного накопления лидарных сигналов для всех комбинаций состояний поляризации зондирующего и регистрируемого обратно рассеянного излучения, необходимых для получения полной МОРС облака. Также, расположение ряда трасс регулярного гражданского авиационного сообщения в радиусе 100 км от места расположения лидара НИ ТГУ позволяет систематически исследовать конденсационные следы самолётов. Малая дистанция (около 6 км) до зенитного пиранометра ИМКЭС СО РАН обеспечивает выполнение комплексных лидарно-актинометрических измерений, позволяя исследовать воздействие облаков с теми или иными геометрическими и оптическими характеристиками на потоки суммарной солнечной радиации в приземном слое.

В диссертационной работе обобщены данные исследований оптических характеристик, механизмов формирования и особенностей строения ОВЯ как

естественного, так и антропогенного происхождения. Основные результаты перечислим ниже.

1. Разработан пакет программ для конвертации, суммирования и визуализации лидарных данных, расчёта оптических и геометрических характеристик ОВЯ, а также загрузки аэрологических данных из сети Интернет.
2. Разработана программа для сбора прогностической метеорологической информации и планирования лидарных экспериментов, а также программа для записи траекторий полётов самолётов на основе данных ADS-B мониторинга.
3. Проведены многолетние экспериментальные исследования облаков верхнего яруса естественного и антропогенного происхождения в Западно-Сибирском регионе (г. Томск) с помощью высотного матричного поляризационного лидара НИ ТГУ. Получен статистически значимый массив данных, позволяющий оценить как сезонную, так и суточную изменчивость оптических и микрофизических характеристик ОВЯ.
4. Установлено, что около 30% ОВЯ над Томском, зарегистрированных в 2016–2020 гг., состояли из ледяных кристаллов с преимущественной горизонтальной пространственной ориентацией.
5. Впервые оценены характерные размеры зеркальных областей ОВЯ: они лежат в пределах от единиц до 30 км.
6. Разработана и апробирована методика идентификации и исследования эволюции конденсационных следов самолётов на основе совместного анализа лидарных, траекторных и метеорологических данных.
7. Установлено, что в период с сентября 2019 г. по сентябрь 2020 г. в 75% случаев зарегистрированные лидаром конденсационные следы самолётов были зеркальными.
8. В комплексных лидарно-пиранометрических экспериментах показано, что зеркальные ОВЯ уменьшают на уровне Земной поверхности поток рассеянной солнечной радиации в зените по сравнению с незеркальными,

причём величина уменьшения зависит от степени проявления зеркальных свойств облака.

9. Использование созданного программного обеспечения позволило повысить эффективность использования лидара НИ ТГУ, сократить время обработки экспериментальных данных, а также упростить выделение массивов, соответствующих регистрации облаков с преимущественно горизонтальной ориентацией ледяных кристаллов, и сопоставление их с вертикальными профилями метеорологических величин и траекториями самолётов. Кроме того, повысилась информационная обеспеченность оператора.

Полученные результаты могут быть использованы для разработки радиационных моделей атмосферы, адекватно отражающих оптические свойства ОВЯ.

Автор глубоко благодарит научного руководителя, профессора НИ ТГУ, д.ф.-м.н., лауреата Государственной премии СССР Самохвалова Игнатия Викторовича за постановку проблемы, цели и задач работы и неоценимую помощь при её выполнении, а также сотрудникам научно-исследовательской лаборатории лазерного зондирования и сотрудникам кафедры оптико-электронных систем и дистанционного зондирования РФФ НИ ТГУ за содействие при выполнении длительных лидарных экспериментов, участие в разработке программ для обработки лидарных данных и плодотворные дискуссии. Автор благодарит д.т.н., профессора НИ ТГУ Владимира Тимофеевича Калайду за консультации по статистической обработке лидарных данных. Автор признателен сотруднику ИОА СО РАН Сергею Николаевичу Волкову за предоставленный программный код алгоритмов коррекции лидарных сигналов и приведения МОРС облаков к плоскости вертикальной симметрии и консультации. Автор выражает благодарность сотруднику ИМКЭС СО РАН Сергею Викторовичу Зуеву за предоставленные данные актинометрических измерений, интерес к работе и оказанную поддержку.

## **Список использованных источников и литературы**

1. Wang, J. Changing lengths of the four seasons by global warming [Текст] / J. Wang, Y. Guan, L. Wu, X. Guan, W. Cai, J. Huang, W. Dong, B. Zhang // *Geophysical Research Letters*. – 2021. – V. 48. – e2020GL091753.
2. Caesar, L. Observed fingerprint of a weakening Atlantic Ocean overturning circulation [Текст] / L. Caesar, S. Rahmstorf, A. Robinson, G. Feulner, V. Saba // *Nature*. – 2018. – V. 556. – P. 191–196.
3. Notz, D. Arctic Sea Ice in CMIP6 [Текст] / D. Notz, J. Dörr, D.A. Bailey, E. Blockley, M. Bushuk, J.B. Debernard, E. Dekker, P. DeRepentigny, D. Docquier, N.S. Fučkar, J.C. Fyfe, A. Jahn, M. Holland, E. Hunke, D. Iovino, N. Khosravi, G. Madec, F. Massonnet, S. O'Farrell, A. Petty, A. Rana, L. Roach, E. Rosenblum, C. Rousset, T. Semmler, J. Stroeve, T. Toyoda, B. Tremblay, H. Tsujino, M. Vancoppenolle // *Geophysical Research Letters*. – 2020. – V. 47. – e2019GL086749.
4. Coffel, E.D. The impacts of rising temperatures on aircraft takeoff performance [Текст] / E.D. Coffel, T.R. Thompson, R.M. Horton // *Climatic Change*. – 2017. – V. 144. – P. 381–388.
5. Старик, А.М. Авиация и атмосферные процессы [Текст] / А.М. Старик, А.Н. Фаворский // *Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем*. – 2015. – Т. 20, № 1 (40). – С. 1–20.
6. Кондратьев, К.Я. Неопределенности данных наблюдений и численного моделирования климата [Текст] / К.Я. Кондратьев // *Метеорология и гидрология*. – 2004. – № 4. – С. 93–119.
7. Heysmsfield, A.J. Cirrus clouds [Текст] / A.J. Heysmsfield, M. Krämer, A. Luebke, P. Brown, D.J. Cziczo, C. Franklin, P. Lawson, U. Lohmann, G. McFarquhar, Z. Ulanowski, K. Van Tricht // *Meteorological Monographs*. – 2017. – V. 58.

8. Liou, K.N. Influence of cirrus clouds on weather and climate processes: a global perspective [Текст] / K.N. Liou // *Monthly Weather Review*. – 1986. – V. 114. – P. 1167–1199.
9. Wylie, D.P. Four years of global cirrus cloud statistics using HIRS [Текст] / D.P. Wylie, W.P. Menzel, H.M. Woolf, K.I. Strabala // *Journal of Climate*. – 1994. – V. 7. – P. 1972–1986.
10. Дмитриева-Арраго, Л.Р. Роль фазового состава облаков в формировании потоков коротковолновой и длинноволновой радиации [Текст] / Л.Р. Дмитриева-Арраго, М.А. Трубина, М.А. Толстых // *Труды Гидрометцентра России*. – 2017. – № 363. – С. 19–34.
11. *International Cloud Atlas. Vol. 1: Manual on the Observation of Clouds and Other Meteors (Party Annex I to WMO Technical Regulations)*. – Geneva: Secretariat of the World Meteorological Organization, 1975.
12. Радиационные свойства перистых облаков [Текст] / Под ред. Е.М. Фейгельсон. – М.: Наука, 1989. – 223 с.
13. Shanks, J.G. Specular scattering in cirrus clouds [Текст] / J.G. Shanks, D.K. Lynch // *Proceedings of SPIE*. – 1995. – V. 2578. – P. 227–238.
14. Морозов, А.М. Наблюдение зеркального отражения освещенной подстилающей поверхности облачным слоем из ледяных пластинок [Текст] / А.М. Морозов, В.П. Галилейский, А.И. Елизаров, Д.В. Кокарев // *Оптика атмосферы и океана*. – 2017. – Т. 30, № 1. – С. 88–92.
15. Толстых, М.А. Глобальная полулагранжева модель численного прогноза погоды. – М.; Обнинск: ОАО ФОР, 2010. – 111 с.
16. Baran, A. A review of the light scattering properties of cirrus [Текст] / A. Baran // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. – 2009. – V. 110, No. 14. – P. 1239–1260.
17. Атлас облаков [Текст] / Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), Гл. геофиз. Обсерватория им. А.И. Воейкова; [Д. П. Беспалов и др.; ред.: Л. К. Сурыгин]. – Санкт-Петербург : Д’АРТ, 2011. – 248 с.

18. Sassen, K. A midlatitude cirrus cloud climatology from the Facility for Atmospheric Remote Sensing. Part I: Macrophysical and synoptic properties [Текст] / K. Sassen, J.R. Campbell // *Journal of the Atmospheric Sciences*. – 2001. – V. 58, No. 5. – P. 481–496.
19. Sassen, K. Midlatitude Cirrus Clouds Derived from Hurricane Nora: A Case Study with Implications for Ice Crystal Nucleation and Shape [Текст] / K. Sassen, W.P. Arnott, D.O'C. Starr, G.G. Mace, Zh. Wang, M.R. Poellot // *Journal of the Atmospheric Sciences*. – 2003. – V. 60, No. 7. – P.873–891.
20. Balin, Yu.S. Observations of specular reflective particles and layers in crystal clouds [Текст] / Yu.S. Balin, B.V. Kaul, G.P. Kokhanenko, I.E. Penner // *Optics Express*. – 2011. – V. 19, No. 7. – P. 6209–6214.
21. Самохвалов, И.В. Матрица обратного рассеяния света зеркально отражающих слоёв облаков верхнего яруса, образованных кристаллическими частицами, преимущественно ориентированными в горизонтальной плоскости [Текст] / И.В. Самохвалов, Б.В. Кауль, С.В. Насонов, И.В. Животенюк, И.Д. Брюханов // *Оптика атмосферы и океана*. – 2012. – Т. 25, № 5. – С. 403–411.
22. Minnis, P. Contrails, Cirrus Trends, and Climate [Текст] / P. Minnis, J.K. Ayers, R. Palikonda, D. Phan // *Journal of Climate*. – 2004. – V. 17, No. 8. – P. 1671–1685.
23. Kärcher, B. Formation and radiative forcing of contrail cirrus [Текст] / B. Kärcher // *Nature Communications*. – 2018. – No. 9. – 1824.
24. Gierens, K. Statistical analysis of contrail lifetimes from a satellite perspective [Текст] / K. Gierens, M. Vazquez-Navarro // *Meteorologische Zeitschrift*. – 2018. – V. 27, No. 3. – P. 183–193.
25. Розенберг, Г.В. Вектор-параметр Стокса [Текст] / Г.В. Розенберг // *Успехи физических наук*. – 1955. – Т. 56. – С. 79–110.
26. Кауль, Б.В. Оптико-локационный метод поляризационных исследований анизотропных аэрозольных сред [Текст]: дис. докт. физ.-мат. наук. Томск, 2004. – 219 с.

27. University of Wyoming [Электронный ресурс]. URL: <http://weather.uwyo.edu> (дата обращения: 01.06.2022 г.).
28. Flightradar24. Live Air Traffic [Электронный ресурс]. URL: <https://www.flightradar24.com> (дата обращения: 01.06.2022 г.).
29. Кауль, Б.В. Результаты исследований кристаллических облаков посредством лидарных измерений матриц обратного рассеяния света [Текст] / Б.В. Кауль, С.Н. Волков, И.В. Самохвалов // Оптика атмосферы и океана. – 2003. – Т. 16, № 4. – С. 354–361.
30. Noel, V. A global view of horizontally oriented crystals in ice clouds from Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation (CALIPSO) [Текст] / V. Noel, H. Chepfer // Journal of Geophysical Research. – 2010. – V. 115.
31. Российский гидрометеорологический энциклопедический словарь [Текст] / Под ред. А.И. Бедрицкого. – СПб.; М.: Летний сад, 2009. – Т. 2: К–П. – 312 с.
32. Reichardt, J. Optical-microphysical cirrus model [Текст] / J. Reichardt, S. Reichardt, R.-F. Lin, M. Hess, T.J. McGee, D.O. Starr // Journal of Geophysical Research. – 2008. – V. 113, No. D22. – D22201.
33. Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Текст], edited by: Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., and Midgley P.M. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
34. Immler, F. Cirrus, contrails and ice supersaturated regions in high pressure systems at northern mid latitudes [Текст] / F. Immler, R. Treffeisen, D. Engelbart, K. Krüger, O. Schrems // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2008. – V. 8. – P. 1689–1699.
35. Ström, J. Cirrus cloud occurrence as function of ambient relative humidity: a comparison of observations obtained during the INCA experiment [Текст] / J. Ström, M. Seifer, B. Kärcher, J. Ovarlez, A. Minikin, J.-F. Gayet, R. Krejci,



- A. Petzold, F. Auriol, W. Haag, R. Busen, U. Schumann, H.C. Hansson // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2003. – V. 3. – P. 1807–1816.
36. Lynch, D.K., Sassen, K., Starr, O.C., Stephens, G. (eds.) *Cirrus* [Текст]. Oxford: University Press, 2002.
37. *Облака и облачная атмосфера. Справочник* [Текст]; под ред. И.П. Мазина, А.Х. Хргиана. Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 648 с.
38. Волковицкий, О.А., Павлова, Л.Н., Петрушин, А.Г. *Оптические свойства кристаллических облаков* [Текст]. Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 198 с.
39. Саенко, А.Г. *Прозрачность конденсационных следов и перистых облаков* [Текст]: дис. на соискание степени канд. физ.-мат. наук. СПб, 2006. – 155 с.
40. Minnis, P. Transformation of contrails into cirrus during SUCCESS [Текст] / P. Minnis, D.F. Young, D.P. Garber, L. Nguyen, W.L. Smith Jr., R. Palikonda // *Geophysical Research Letters*. – 1998. – V. 25, No. 8. – P. 1157–1160.
41. Bock, L. The temporal evolution of a long-lived contrail cirrus cluster: Simulations with a global climate model [Текст] / L. Bock, U. Burkhardt // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 2016. – V. 121, No. 7. – P. 3548–3565.
42. Noel, V. Study of ice crystal orientation in cirrus clouds based on satellite polarized radiance measurements [Текст] / V. Noel, H. Chepfer // *J. Atmos. Sci.* – 2005. – V. 61, No. 16. – P. 2073–2081.
43. Маховер, З.М., Нудельман, Л.А. *Климатология облаков верхнего яруса. Обзор их микрофизических и оптических свойств. Радиационные свойства перистых облаков* [Текст]: Сб. статей. АН СССР, Институт физики атмосферы. М.: Наука, 1989. – С. 6–31.
44. Balin, Yu.S. Lidar investigation of polarization characteristics of meteorological formations [Текст] / Yu.S. Balin, G.O. Zadde, V.E. Zuev, G.G. Matvienko, I.V. Samokhvalov, V.S. Shamanaev // *Proc. of Int. Conf. 'Structure and General Circulation of the Upper and Lower Atmospheres and*

- Possible Anthropogenic Perturbations?'. – 1974. – V. 1. – Melbourne, Australia. – P. 215–228.
45. Ludlum, D.M. National Audubon Society field guide to North American Weather [Текст]. New York: Knopf A.A.: Distributed by Random House, 2001.
  46. Тарасова, Т.А. Расчёт потоков солнечного излучения при перистой облачности и сравнение с экспериментами [Текст] // Радиационные свойства перистых облаков. М.: Наука, 1989. – С. 169–176.
  47. Seifert, P. Cirrus optical properties observed with lidar, radiosonde, and satellite over the tropical Indian Ocean during the aerosol-polluted northeast and clean maritime southwest monsoon [Текст] / P. Seifert, A. Ansmann, D. Müller, U. Wandinger, D. Althausen, A.J. Heymsfield, S.T. Massie, C. Schmitt // Journal of Geophysical Research. – 2007. – V. 112, No. D17.
  48. Takano, Y. Solar radiative transfer in cirrus clouds. Part II: Theory and computation of multiple scattering in an anisotropic medium [Текст] / Y. Takano, K. Liou // Journal of the Atmospheric Sciences. – 1989. – V. 46, No. 1. – P. 20–36.
  49. Баранов, А.М. Облака верхнего яруса и условия полётов в них [Текст]. Л.: Гидрометеоиздат, 1960. – 99 с.
  50. Курбатова, А.В. Некоторые пространственные характеристики облаков верхнего яруса над северо-западом европейской территории СССР [Текст] / А.В. Курбатова, О.В. Козловская, Н.И. Мазурин // Труды ЛГМИ. – 1961. – Вып. 12. – С. 34–42.
  51. Heymsfield, A.J. Properties of cirrus generating cells [Текст] / A.J. Heymsfield, R.G. Knollenberg // Journal of the Atmospheric Sciences. – 1972. – V. 29, No. 7. – P. 1358–1366.
  52. Миннарт, М. Свет и цвет в природе [Текст]. М.: Наука, 1969. – 360 с.
  53. Зверева, С.В. В мире солнечного света [Текст]. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. – 160 с.

54. Whipple, F.J.F. How are mock suns produced? [Текст] / F.J.F. Whipple // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 1940. – V. 66. – P. 275–279.
55. Sassen, K. Polarization and Brewster angle properties of light pillars [Текст] / K. Sassen // Journal of the Optical Society of America A. – 1987. – V. 4, No. 3. – P. 570–580.
56. Greenler, R.G. The origin of sun pillars [Текст] / R.G. Greenler, A.J. Mallmann, M. Drinkwine, A.J. Mallmann, G. Blumenthal // American Scientist. – 1972. – V. 60. – P. 292–302.
57. Platt, C.M.R. Lidar backscatter from horizontal ice crystal plates [Текст] / C.M.R. Platt // Journal of Applied Meteorology and Climatology. – 1978. – V. 17, No. 4. – P. 482–488.
58. Thomas, L. Lidar observations of the horizontal orientation of ice crystals in cirrus clouds [Текст] / L. Thomas, J.C. Cartwright, D.P. Wareing // Tellus B: Chemical and Physical Meteorology. – 1990. – V. 42, No. 2. – P. 211–216.
59. Zhou, C. Study of Horizontally oriented ice crystals with CALIPSO observations and comparison with Monte Carlo radiative transfer simulations [Текст] / C. Zhou, P. Yang, A.E. Dessler, Y. Hu, B.A. Baum // Journal of Applied Meteorology and Climatology. – 2012. – V. 51, No. 7. – P. 1426–1439.
60. Sassen, K. A midlatitude cirrus cloud climatology from the facility for atmospheric remote sensing. Part II: Microphysical properties derived from lidar depolarization [Текст] / K. Sassen, S. Benson // Journal of the Atmospheric Sciences. – 2001. – V. 58, No. 15. – P. 2103–2112.
61. Del Guasta, M. Use of polarimetric lidar for the study of oriented ice plates in clouds [Текст] / M. Del Guasta, E. Vallar, O. Riviere, F. Castagnoli, V. Venturi, M. Morandi // Applied Optics. – 2006. – V. 45, No. 20. – P. 4878–4887.
62. Балин, Ю.С. Наблюдение зеркально отражающих частиц и слоев в кристаллических облаках [Текст] / Ю.С. Балин, Б.В. Кауль,

- Г.П. Коханенко // Оптика атмосферы и океана. – 2011. – Т. 24, № 4. – С. 293–299.
63. Johnston, H.S. Reduction of stratospheric ozone by nitrogen oxide catalysis from supersonic transport exhaust [Текст] / H.S. Johnston // Science. – 1971. – V. 173. – P. 517–522.
64. Crutzen, P.J. Ozone production rates in oxygen, hydrogen, nitrogen oxide atmosphere [Текст] / P.J. Crutzen // Journal of Geophysical Research. – 1971. – V. 76, No. 30. – P. 7311–7327.
65. Физика облаков [Текст] / под ред. А.Х. Хргиана. Л.: Гидрометеоиздат, 1961. – 457 с.
66. Weickmann, H. Formen und Bildung atmosphärischer Eiskristalle [Текст] / H. Weickmann // Beiträge zur Physik der freien Atmosphäre. – 1945. – V. 28. – P. 12–52.
67. Irvine, E.A. A Lagrangian analysis of icesupersaturated air over the North Atlantic [Текст] / E.A. Irvine, B.J. Hoskins, K.P. Shine // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2014. – V. 119. – P. 90–100.
68. Gierens, K. On the size distribution of ice-supersaturated regions in the upper troposphere and lowermost stratosphere [Текст] / K. Gierens, P. Spichtinger // Annales Geophysicae. – 2000. – V. 18, No. 4. – P. 499–504.
69. Spichtinger, P. Ice supersaturation in the tropopause region over Lindenberg, Germany [Текст] / P. Spichtinger, K. Gierens, U. Leiterer, H. Dier // Meteorologische Zeitschrift. – 2003. – V. 12. – P. 143–156.
70. Rädcl, G. Evaluation of the use of radiosonde humidity data to predict the occurrence of persistent contrails [Текст] / G. Rädcl, K. Shine // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 2007. – V. 133. – P. 1413–1423.
71. Baughum, S.L. Properties of ice-supersaturated layers based on radiosonde data analysis [Текст] / S.L. Baughum, M.Y. Danilin, L.M. Miloshevich, A.J. Heymsfield // Proceedings of the TAC-2, June 22—25. – 2009. – P. 169–173.

72. Yu, F. The role of ions in the formation and evolution of particles in aircraft plumes [Текст] / F. Yu, R.P. Turco // *Geophysical Research Letters*. – 1997. – V. 25, No. 15. – P. 313–316.
73. Arnold, F. Detection of massive negative chemiions in the exhaust plume of a jet aircraft in flight [Текст] / F. Arnold, J. Curtius, B. Sierau // *Geophysical Research Letters*. – 1999. – V. 26, No. 11. – P. 1577–1580.
74. Lavigne, C. Solar glint from oriented crystals in cirrus clouds [Текст] / C. Lavigne, A. Roblin, P. Chervet // *Applied Optics*. – 2008. – V. 47, No. 33. – P. 6266–6276.
75. Masuda, K. Influence of particle orientation on retrieving cirrus cloud properties by use of total and polarized reflectances from satellite measurements [Текст] / K. Masuda, H. Ishimoto // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. – 2004. – V. 85, No. 2. – P. 183–193.
76. Heymsfield, A.J. Cirrus crystal terminal velocities [Текст] / A.J. Heymsfield, J. Iaquinta // *Journal of the Atmospheric Sciences*. – 2000. – V. 57, No. 7. – P. 916–938.
77. Westbrook, C.D. The fall speeds of sub-100mm ice crystals [Текст] / C.D. Westbrook // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. – 2008. – V. 134. – P. 1243–1251.
78. Spichtinger, P. Modelling of cirrus clouds - Part 1b: Structuring cirrus clouds by dynamics [Текст] / P. Spichtinger, K.M. Gierens // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2009. – V. 9, No. 2. – P. 707–719.
79. Matthews, W.H., Kellogg, W.W., Robinson, G.D. (eds). *Man's Impact on Climate* [Текст]. MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1971.
80. Grassl, H. in *Air Traffic and the Environment – Background, Tendencies, and Potential Global Atmospheric Effects* [Текст] (ed Schumann, U.). Springer-Verlag, Heidelberg, Germany, 1990. – P. 124–137.
81. Fahey, D.W., Schumann, U. Aviation-produced aerosols and cloudiness. In *Aviation and the Global Atmosphere. A Special Report of IPCC Working*

- Groups I and III. Intergovernmental Panel on Climate Change [Текст] (ed. Penner, J.E.). Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1999.
82. Heymsfield, A.J. Contrail microphysics [Текст] / A.J. Heymsfield, D. Baumgardner, P.J. DeMott, P. Forster, K. Gierens, B. Kärcher // *Bulletin of the American Meteorological Society*. – 2010. – V. 91. – P. 465–472.
83. Burkhardt, U. Global radiative forcing from contrail cirrus [Текст] / U. Burkhardt, B. Kärcher // *Nature Climate Change*. – 2011. – V. 1. – P. 54–58.
84. Duda, D. Estimates of cloud radiative forcing in contrail clusters using GOES imagery [Текст] / D. Duda, P. Minnis, L. Nguyen // *Journal of Geophysical Research*. – 2001. – V. 106, No. D5. – P. 4927–4937.
85. Voigt, C. ML-CIRRUS: The airborne experiment on natural cirrus and contrail cirrus with the high-altitude long-range research aircraft HALO [Текст] / C. Voigt, U. Schumann, A. Minikin // *Bulletin of the American Meteorological Society*. – 2017. – V. 98, No. 2. – P. 271–288.
86. Дмитриева, Т.М. Атмосферные выбросы парниковых газов и загрязняющих веществ от воздушных судов в пределах Российской Федерации [Текст]: дис. канд. геогр. наук. Томск, 2019. – 142 с.
87. Fiocco, G. Detection of scattering layers in the upper atmosphere (60–140 km) [Текст] / G. Fiocco, L.D. Smullin // *Nature*. – 1963. – V. 199. – P. 1275–1276.
88. Иванов, А.П. Оптика рассеивающих сред [Текст]. Минск: Наука и техника, 1969. – 592 с.
89. Зуев, В.Е. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере [Текст]. М.: Сов.радио, 1970. – 496 с.
90. Лазерный контроль атмосферы [Текст]; под ред. Э.Д. Хинкли, русский перевод под ред. В.Е. Зуева. М.: Мир, 1979. – 416 с.
91. Захаров, В.М., Костко, О.К. Метеорологическая лазерная локация [Текст]. Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 222 с.
92. Lyot, B. Recherches sur la polarisation de la lumière des planètes et de quelques substances terrestres [Текст]. PhD thesis, Université de Paris, 1929.

93. Lyot, B. Research of the polarization of light from planets and from some terrestrial substances [Текст]. NASA Technical Translation. 1964.
94. McNeil, W.R. Lidar polarization studies of the troposphere [Текст] / W.R. McNeil, A.I. Carswell // Applied Optics. – 1975. – V. 14, No. 9. – P. 2158–2168.
95. Задде, Г.О. Двухволновой поляризационный лидар для измерения атмосферных аэрозолей [Текст] / Г.О. Задде, Б.В. Кауль, Г.В. Ушаков // 4-й Всесоюзный симпозиум по лазерному зондированию атмосферы. 1976. Томск, ИОА СО АН СССР, тез. докл. – С. 236-237.
96. Derr, V.E. Depolarization of lidar returns from Virga and source clouds [Текст] / V.E. Derr, N.L. Abshire, R.E. Cupp, G.T. McNice // Journal of Applied Meteorology. – 1976. – V. 15, No. 11. – P. 1200–1203.
97. Зуев, В.Е. Лидарные исследования рассеяния света несферическими частицами верхней атмосферы [Текст] / В.Е. Зуев, Б.В. Кауль, Н.В. Козлов и др. // 9-я Международная конференция по лазерной локации. 1979. Мюнхен, ФРГ, тез. докл. – С. 25–27.
98. Ван де Хюльст, Г. Рассеяние света малыми частицами [Текст]. М.: ИЛ, 1961. – 536 с.
99. Кауль, Б.В. Многоволновой поляризационный лидар «Стратосфера 1М» [Текст] / Б.В. Кауль, О.А. Краснов, И.В. Самохвалов, В.Д. Шелевой // 8-й Всесоюзный симпозиум по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. 1986. Томск, тез. докл. – С. 58–60.
100. Кауль, Б.В. Лидарные исследования ориентации частиц в кристаллических облаках [Текст] / Б.В. Кауль, О.А. Краснов, А.Л. Кузнецов, Е.Р. Половцева, И.В. Самохвалов, А.П. Стыкон // Оптика атмосферы и океана. – 1997. – Т. 10. – С. 191–201.
101. Third International Lidar Researchers Directory [Текст] / Compiled by M.P. Cormick. Atmosph. Sci. Division, NASA Langley Research Center, 1993. – P. 71.

102. Unique Research Facilities in Russia [Текст]. Paris: Organ. for Economic Co-Operation and Development. – 1995. – P. 161–164.
103. История ЦАО: Центральной аэрологической обсерватории 70 лет [Текст]. Долгопрудный, 2011. – 127 с.
104. Кауль, Б.В. Оценка влияния ориентации цилиндрических частиц льда на матрицу экстинкции [Текст] / Б.В. Кауль, Д.Н. Ромашов // Оптика атмосферы и океана. – 1997. – Т. 10. – С. 1485–1492.
105. Кауль, Б.В. Исследование кристаллических облаков на основе локационных измерений матриц обратного рассеяния света [Текст] / Б.В. Кауль, А.Л. Кузнецов, Е.Р. Половцева, И.В. Самохвалов // Оптика атмосферы и океана. – 1993. – Т. 6, № 4. – С. 423–428.
106. Кауль, Б.В. Поляризационное зондирование аэрозольных образований верхнего яруса [Текст] / Б.В. Кауль, О.А. Краснов, А.Л. Кузнецов, И.В. Самохвалов // Оптика атмосферы и океана. – 1991. – Т. 4, № 4. – С. 394–403.
107. Кауль, Б.В., Самохвалов, И.В. Поляризационные лидарные измерения характеристик атмосферных аэрозолей // Региональный мониторинг атмосферы. Ч. 2. Новые приборы и методики измерений [Текст] / Под ред. М.В. Кабанова. Томск: Спектр, 1997. – С. 34–58.
108. Кауль, Б.В. Сравнение экспериментальных и расчетных матриц обратного рассеяния кристаллических облаков [Текст] / Б.В. Кауль, И.В. Самохвалов, Д.Н. Ромашов // Оптика атмосферы и океана. – 1997. – Т. 10, № 10. – С. 1115–1121.
109. Ромашов, Д.Н. Банк данных для интерпретации результатов поляризационного зондирования кристаллических облаков [Текст] / Д.Н. Ромашов, Б.В. Кауль, И.В. Самохвалов // Оптика атмосферы и океана. – 2000. – Т. 13, № 9. – С. 854-861.
110. Кауль, Б.В. Помеха многократного рассеяния при лидарных измерениях матриц обратного рассеяния света кристаллических облаков [Текст] /



- Б.В. Кауль, И.В. Самохвалов // Оптика атмосферы и океана. – 1999. – Т. 12, № 5. – С. 401–405.
111. Волков, С.Н. Методика обработки результатов лидарных измерений матриц обратного рассеяния света [Текст] / С.Н. Волков, Б.В. Кауль, И.В. Самохвалов // Оптика атмосферы и океана. – 2002. – Т. 15, № 11. – С. 982–986.
112. Кауль, Б.В. О преимуществе использования круговой поляризации лазерного излучения при зондировании кристаллических облаков [Текст] / Б.В. Кауль, Д.Н. Ромашов, И.В. Самохвалов // Оптика атмосферы и океана. – 2001. – Т. 14, № 8. – С. 687–691.
113. Takano, Y. Solar radiative transfer in cirrus clouds. Part I: Single-scattering and optical properties of hexagonal ice crystals [Текст] / Y. Takano, K.N. Liou // Journal of the Atmospheric Sciences. – 1989. – V. 46, No. 1. – P. 3–19.
114. Chepfer, H. Observations of horizontally oriented ice crystals in cirrus clouds with POLDER-1/ADEOS-1 [Текст] / H. Chepfer, G. Brogniez, P. Goloub, F.M. Bréon, P.H. Flamanta // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. – 1999. – V. 63. – P. 521–543.
115. Liou, K.N. Interpretation of cirrus cloud polarization measurements from radiative transfer theory [Текст] / K.N. Liou, Y. Takano // Geophysical Research Letters. – 2002. – V. 29, No. 9.
116. Lakkis, S.G. Monitoring cirrus clouds with lidar in the Southern Hemisphere: A local study over Buenos Aires. 1. Tropopause heights [Текст] / S.G. Lakkis, M. Lavorato, P.O. Canziani // Atmospheric Research. – 2009. – V. 92, No. 1. – P. 18–26.
117. Platt, C.M.R. Some microphysical properties of an ice cloud from lidar observation of horizontally oriented crystals [Текст] / C.M.R. Platt, N.L. Abshire, G.T. McNice // Journal of Applied Meteorology. – 1978. – V. 17, No. 8. – P. 1220–1224.

118. Yang, P. Enhanced lidar backscattering by quasi-horizontally oriented ice crystals plates in cirrus clouds [Текст] / P. Yang, Y.X. Hu, D.M. Winker, J. Zhao, C.A. Hostetler, L. Poole, B.A. Baum, M.I. Mishchenko, J. Reichardt // *Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. – 2003. – V. 79–80. – P. 1139–1157.
119. Hunt, W.H. CALIPSO lidar description and performance assessment [Текст] / W.H. Hunt, D.M. Winker, M.A. Vaughan, K.A. Powell, P.L. Lucker, C. Weimer // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. – 2009. – V. 26, No. 7. – P. 1214–1228.
120. Kaul, B.V. Investigating particle orientation in cirrus clouds by measuring backscattering phase matrices with lidar [Текст] / B.V. Kaul, I.V. Samokhvalov, S.N. Volkov // *Applied Optics*. – 2004. – V. 43, No. 36. – P. 6620–6628.
121. Hayman, M. Polarization lidar operation for measuring backscatter phase matrices of oriented scatterers [Текст] / M. Hayman, S. Spuler, B. Morley, J. VanAndel // *Optics Express*. – 2012. – V. 20, No. 28. – P. 29553–29567.
122. Vivekanandan, J. Polarimetric radar estimators based on a constrained gamma drop size distribution model [Текст] / J. Vivekanandan, G. Zhang, E. Brandes // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. – 2004. – V. 43, No. 2. – P. 217–230.
123. Breon, F.M. Horizontally oriented plates in clouds [Текст] / F.M. Breon, B. Dubrulle // *Journal of the Atmospheric Sciences*. – 2004. – V. 61, No. 23. – P. 2888–2898.
124. Волков, С.Н. Поляризационный лидар нового поколения для определения параметров атмосферы на основе измерения матриц обратного рассеяния аэрозолям и облаками / С.Н. Волков, И.В. Самохвалов, Д.Н. Kim // *Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Материалы XX Международного симпозиума [Электронный ресурс]*. Томск: Издательство ИОА СО РАН. 2014. 1 CD-ROM. – С. С376–С378.

125. Volkov, S.N. Investigation of East Asian clouds with polarization light detection and ranging [Текст] / S.N. Volkov, I.V. Samokvalov, H.D. Cheong, D. Kim // *Applied Optics*. – 2015. – V. 54, No. 11. – P. 3095–3105.
126. Межерис, Р. Лазерное дистанционное зондирование [Текст]. М.: Мир, 1987. – С. 550–551.
127. Кауль, Б.В. Теория и результаты лазерного зондирования ориентированных кристаллических частиц в облаках [Текст] / Б.В. Кауль, И.В. Самохвалов // *Оптика атмосферы и океана*. – 2005. – Т. 18, № 12. – С. 1051–1057.
128. Исследования поляризационных характеристик аэрозольного светорассеяния при высотном зондировании / Результаты комплексных экспериментов “Вертикаль-86” и “-87” [Текст]. Под ред. Г.М. Крекова. Томск: Изд. ТНЦ СО АН СССР, 1989. – С. 49–69.
129. Зуев, В.Е., Кауль, Б.В., Самохвалов, И.В., Кирков, К.И., Цанев, В.И. Лазерное зондирование промышленных аэрозолей [Текст]. Новосибирск: Наука, 1986. – 192 с.
130. Jones, R. New method for optical system design: P. I-III [Текст] / R. Jones, H. Hurwitz // *Journal of the Optical Society of America*. – 1941. – V. 31. – P. 488–507.
131. Jones, R. New method for optical system design: P. IV [Текст] / R. Jones // *Journal of the Optical Society of America*. – 1942. – V. 32. – P. 486–498.
132. Jones, R. New method for optical system design: P. V-VI. [Текст] / R. Jones // *Journal of the Optical Society of America*. – 1947. – V. 37. – P. 107–113.
133. Jones, R. New method for optical system design: P. VIII [Текст] / R. Jones // *Journal of the Optical Society of America*. – 1956. – V. 46. – P. 126–132.
134. Mueller, H. Principles of optics [Текст] / H. Mueller // *Journal of the Optical Society of America*. – 1948. – V. 38. – P. 661–670.
135. Самохвалов, И.В. Развитие высотного лидара Томского государственного университета как уникального комплекса для мониторинга атмосферы [Текст] / И.В. Самохвалов, С.М. Бобровников, П.П. Гейко, А.В. Ельников,

- Б.В. Кауль // Оптика атмосферы и океана. – 2006. – Т. 19, № 11. – С. 995–999.
136. Соковых, О.В. Системная интеграция экспериментального оборудования высотного поляризационного лидара [Текст] / О.В. Соковых, И.В. Самохвалов // Оптика атмосферы и океана. – 2013. – Т. 26, № 10. – С. 891–896.
137. Kirillov, N.S. Application of an electro-optical shutter for strobing of lidar signals [Текст] / N.S. Kirillov, I.V. Samokhvalov // Proceedings of SPIE. – 2014. – V. 9292. – 92922D.
138. Насонов, С.В. Оптические характеристики облаков верхнего яруса и их связь с метеорологическими параметрами атмосферы [Текст]: дис. канд. физ.-мат. наук. Томск, 2015. – 114 с.
139. Becker & Hickl [Электронный ресурс]. URL: <https://www.becker-hickl.com/products/pms-400a> (дата обращения: 01.06.2022 г.).
140. Lotis TII [Электронный ресурс]. URL: <https://www.lotis-tii.com> (дата обращения: 01.06.2022 г.).
141. Брюханов, И.Д. Пространственно-временная изменчивость элементов матрицы обратного рассеяния света облаков верхнего яруса [Текст] / И.Д. Брюханов // Сборник тезисов, материалы Двадцать четвертой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых учёных (ВНСКФ-24, Томск): Екатеринбург – Томск: изд-во АСФ России, 2018. – С. 271–272.
142. Брюханов, И.Д. Программно-алгоритмический комплекс для обработки и интерпретации результатов экспериментов по зондированию облаков верхнего яруса на высотном поляризационном лидаре НИ ТГУ / И.Д. Брюханов, С.Н. Волков, И.В. Самохвалов // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы [Электронный ресурс]: Материалы XXV Международного симпозиума. – Томск: Издательство ИОА СО РАН, 2019. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – С. С-384–С-387.

143. Волков, С.Н. Оптические характеристики облаков верхнего яруса по данным лидарного зондирования [Текст]: дис. канд. физ.-мат. наук. Томск, 2004 – 143 с.
144. Самохвалов, И.В. Программно-алгоритмический комплекс коррекции интенсивности лидарного сигнала на статистический и фоновый шум, на просчёты и последствие фотоэлектронных умножителей приёмных каналов лидара [Текст] / И.В. Самохвалов, С.Н. Волков, И.Д. Брюханов // Свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016662035 от 28.10.2016 г.
145. Самохвалов, И.В. Программно-алгоритмический комплекс определения геометрических и оптических параметров облаков на основе данных экспериментов по поляризационному лазерному зондированию атмосферы [Текст] / И.В. Самохвалов, С.Н. Волков, И.Д. Брюханов, Е.В. Ни // Свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017618794 от 25.07.2017 г.
146. Самохвалов, И.В. Исследование оптических характеристик перистых облаков с аномальным обратным рассеянием [Текст] / И.В. Самохвалов, И.Д. Брюханов, С.В. Насонов, И.В. Животенюк, А.П. Стыкон // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 5, № 8. – С. 63–67.
147. Шаманаев, В.С. К оценке коэффициента рассеяния излучения на границе облака [Текст] / В.С. Шаманаев // Оптика атмосферы и океана. – 1992. – Т. 5, № 7. – С. 702–707.
148. I.V. Correction for distortions in lidar measurements of cloud backscattering phase matrices caused by multiple scattering [Текст] / I.V. Samokhvalov, B.V. Kaul, V.V. Bryukhanova, A.A. Doroshkevich, E.P. Zege, L.I. Chaikovskaya, A.V. Malinka // Russian Physics Journal. – 2008. – V. 51, No. 9. – P. 958–964.
149. Doroshkevich, A.A. On the effect of cloud microstructure on the polarization characteristics of double scattering lidar return [Текст] / A.A. Doroshkevich, V.V. Bryukhanova // Proceedings of SPIE. – 2015. – V. 9680. – 968053.

150. Самохвалов, И.В. Программа коррекции элементов экспериментально определённых матриц обратного рассеяния света на вклад многократного рассеяния [Текст] / И.В. Самохвалов, И.Д. Брюханов // Свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018666949 от 25.12.2018 г.
151. Bryukhanov ,I.D. Automation of processing and interpretation of experimental data on polarization laser sensing of high-level clouds [Текст] / I.D. Bryukhanov, S.N. Volkov // Proceedings of SPIE. – 2016. – V. 10035. – 100354J.
152. Самохвалов, И.В. Программно-алгоритмический комплекс расчёта и приведения к плоскости вертикальной симметрии матриц обратного рассеяния света облаков верхнего яруса на основе данных поляризационного лазерного зондирования [Текст] / И.В. Самохвалов, С.Н. Волков, И.Д. Брюханов // Свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017611252 от 01.02.2017 г.
153. Кауль, Б.В. Симметрия матриц обратного рассеяния света в связи с ориентацией несферических аэрозольных частиц [Текст] / Б.В. Кауль // Оптика атмосферы и океана. – 2000. – Т. 13, № 10. – С. 895–900.
154. Самохвалов, И.В. Единая база данных поляризационного лазерного зондирования облаков верхнего яруса: оптические и метеорологические характеристики [Текст] / И.В. Самохвалов, И.Д. Брюханов, С.В. Насонов, С.Н. Волков, Е.В. Ни // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2017. – Т. 60, № 12/2. – С. 147–150.
155. Самохвалов, И.В. Оценка микрофизических характеристик конденсационных следов самолётов по данным поляризационного лидара: теория и эксперимент [Текст] / И.В. Самохвалов, И.Д. Брюханов, В.А. Шишко, Н.В. Кустова, Е.В. Ни, А.В. Коношонкин, О.Ю. Локтюшин, Д.Н. Тимофеев // Оптика атмосферы и океана. – 2019. – Т. 32, № 3. – С. 193–201.

156. Windy: Wind map & weather forecast [Электронный ресурс]. URL: <https://windy.com> (дата обращения: 01.06.2022 г.).
157. Брюханов, И.Д. Проблема интерпретации данных поляризационного лазерного зондирования конденсационных следов самолётов: оценка метеопараметров [Текст] / И.Д. Брюханов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 662. – С. 102–106.
158. Сафонова, Т.В. Авиационная метеорология: учеб. пособие [Текст] / Т.В. Сафонова. – Ульяновск: УВАУ ГА, 2005. – 215 с.
159. University of Wyoming. Description of Sounding Columns [Электронный ресурс]. URL: <http://weather.uwyo.edu/upperair/columns.html> (дата обращения: 01.06.2022 г.).
160. Брюханов, И.Д. Программно-алгоритмический комплекс планирования лидарных экспериментов [Текст] / И.Д. Брюханов // Свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019610524 от 11.01.2019 г.
161. Самохвалов, И.В. Определение матрицы обратного рассеяния света конденсационного следа самолёта / И.В. Самохвалов, И.Д. Брюханов, И.В. Животенюк, С.В. Насонов, Н.С. Кириллов, А.П. Стыкон // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Материалы XXII Международного симпозиума [Электронный ресурс]. Томск: Издательство ИОА СО РАН. – 2016. – 1 CD-ROM. – С. С465–С468.
162. Samokhvalov, I.V. Optical characteristics of contrails according to polarization lidar sensing data [Текст] / I.V. Samokhvalov, I.D. Bryukhanov, S. Park, I.V. Zhivotenyuk, E.V. Ni, A.P. Stykon // Proceedings of SPIE. – 2018. – V. 10833. – 108335J.
163. Локтюшин, О.Ю. Программная реализация алгоритма расчёта дрейфа конденсационных следов самолётов на высотах образования перистых облаков [Текст] / О.Ю. Локтюшин, И.В. Брюханов, И.В. Самохвалов // Актуальные проблемы радиофизики: VIII Международная научно-

- практическая конференция, г. Томск, 1–4 октября 2019 г. Сборник трудов. – Томск : Издательский дом ТГУ, 2019. – С. 319–322.
164. Самохвалов, И.В. Программа расчёта параметров дрейфа конденсационных следов самолётов [Текст] / И.В. Самохвалов, И.Д. Брюханов, О.Ю. Локтюшин // Свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019664453 от 07.11.2019 г.
165. Самохвалов, И.В. Влияние степени ориентации кристаллов в перистых облаках на суммарный поток солнечной радиации: первые эксперименты / И.В. Самохвалов, С.В. Зуев, В.В. Брюханова, С.В. Насонов, И.Д. Брюханов, А.П. Стыкон, И.В. Животенюк, Е.С. Карташова // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Материалы XXII Международного симпозиума [Электронный ресурс]. – Томск: Издательство ИОА СО РАН. – 2016. – 1 CD-ROM. – С. С2–С5.
166. Руководство гидрометеорологическим станциям по актинометрическим наблюдениям, 3-е издание [Текст]. Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 220 с.
167. World Radiation Monitoring Center. Baseline Surface Radiation Network [Электронный ресурс]. URL: <http://bsrn.awi.de> (дата обращения: 01.06.2022 г.).
168. TOR станция [Электронный ресурс]. URL: <https://lop.iao.ru/activity/?id=tor> (дата обращения: 01.06.2022 г.).
169. Samokhvalov, I.V. The technique of synchronous solar radiation measurements while lidar sensing of Ci clouds [Текст] / I.V. Samokhvalov, S.V. Zuev, I.D. Bryukhanov, N.N. Chered'ko, K.N. Pustovalov, E.S. Kartashova // Proceedings of SPIE. – 2016. – V. 10035. – 1003548.
170. Самохвалов, И.В. Влияние «зеркальных» облаков верхнего яруса на потоки солнечной радиации по данным лидарно-актинометрического эксперимента / И.В. Самохвалов, И.Д. Брюханов, С.В. Зуев, И.В. Животенюк // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы. Материалы XXVI Международного симпозиума. Электронный ресурс. –



- Томск: Издательство ИОА СО РАН, 2020. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). –С. С-201–С-204.
171. Parameswaran, K. Lidar observations of cirrus cloud near the tropical tropopause: temporal variations and association with tropospheric turbulence [Текст] / K. Parameswaran, S.V. SunilKumar, B.V. Krishna Murthy, K. Satheesan, Y. Bhavanikumar, M. Krishnaiah, P.R. Nair // Atmospheric Research. – 2003. – V. 69. – P. 29–49.
172. Samokhvalov, I.V. Temporal variability of the specularity of high-level clouds according to the data on laser polarization sensing [Текст] / I.V. Samokhvalov, I.D. Bryukhanov, E.V. Ni // Proceedings of SPIE. – 2020. – V. 11560. – 115604C.
173. Брюханов, И.Д. Оценка размеров зеркальных локальных областей облаков верхнего яруса по данным поляризационного лазерного зондирования [Текст] / И.Д. Брюханов, Е.В. Ни, И.В. Животенюк, А.А. Дорошкевич, А.П. Стыкон, Н.С. Кириллов, И.В. Самохвалов // Актуальные проблемы радиофизики : IX Международная научно-практическая конференция, г. Томск, 14–17 сентября 2021 г. Сборник трудов. – Томск : Издательский дом ТГУ, 2021. – С. 189–192.
174. Самохвалов, И.В. Анализ частоты и условий образования зеркальных облаков верхнего яруса по многолетним данным поляризационного лазерного зондирования [Текст] / И.В. Самохвалов, И.Д. Брюханов, Е.В. Ни, И.В. Животенюк, А.А. Дорошкевич, А.П. Стыкон // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2021. – Вып. 680. – С. 200–204.
175. Самохвалов, И.В. Оптические и радиационные характеристики перистых облаков по данным трёхлетних лидарных и актинометрических исследований в Томском государственном университете [Текст] / И.В. Самохвалов, В.В. Брюханова, И.Д. Брюханов, И.В. Животенюк, Е.В. Ни, С.В. Зуев, Н.Н. Чередыко // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2020. – Т. 63, № 4. – С. 77–83.

176. The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ecmwf.int> (дата обращения: 01.06.2022 г.).
177. Брюханов, И.Д. Влияние зеркальных облаков верхнего яруса на потоки рассеянной солнечной радиации в зените [Текст] / И.Д. Брюханов, С.В. Зуев, И.В. Самохвалов // Оптика атмосферы и океана. – 2021. – Т. 34, № 4. – С. 272–279.
178. Абакумова, Г.М., Горбаренко, Е.В. Прозрачность атмосферы в Москве за последние 50 лет и ее изменения на территории России [Текст]. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. – 192 с.
179. Зуев, С.В. Многоэлементный ориентированный измеритель характеристик солнечного излучения [Текст] / С.В. Зуев // Оптика атмосферы и океана. – 2019. – Т. 32, № 6. – С. 504–508.
180. Брюханов, И.Д. Лидарно-пиранометрические исследования зеркальных облаков верхнего яруса / И.Д. Брюханов, С.В. Зуев, И.В. Самохвалов // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы. Материалы XXVII Международного симпозиума. Электронный ресурс. – Томск: Издательство ИОА СО РАН, 2021. – С. С-351–С-354.