

ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи

Крючков Александр Владимирович

**ЛИДАРНЫЙ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС КОНТРОЛЯ  
ВЫСОТЫ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ ОБЛАЧНОСТИ С БЕЗОПАСНОЙ ДЛЯ  
ГЛАЗ ИНТЕНСИВНОСТЬЮ ИЗЛУЧЕНИЯ**

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий,  
веществ и природной среды

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук и Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

**Научный руководитель:**

**Садовников Сергей Александрович**

кандидат физико-математических наук,  
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт оптики атмосферы  
им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской  
академии наук, заведующий лабораторией

**Официальные оппоненты:**

**Грузнов Владимир Матвеевич**

доктор технических наук, доцент, Федеральное  
государственное бюджетное учреждение науки  
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им.  
А.А. Трофимука Сибирского отделения  
Российской академии наук, г. Новосибирск,  
главный научный сотрудник

**Красненко Николай Петрович**

доктор физико-математических наук, профессор,  
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт мониторинга  
климатических и экологических систем  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
заведующий лабораторией, главный научный  
сотрудник

Защита состоится «27» декабря 2024 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.13 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215.



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте [dis.tpu.ru](http://dis.tpu.ru) при помощи QR-кода.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета ДС.ТПУ.13  
кандидат технических наук, доцент

Е.А. Шевелева

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Высота нижней границы облачности является одним из факторов, влияющих на безопасности взлета и посадки воздушных судов, так как она определяет ту высоту, на которой пилот сможет осуществить визуальный контакт с землёй. Значения высоты нижней границы облачности входят в эксплуатационный минимум. Эксплуатационный минимум в авиации – минимальные значения высоты нижней границы облаков и горизонтальной видимости, при которых возможно выполнение взлётов, посадок и полётов по маршруту [1].

Высота расположения нижней границы облаков имеет большое практическое значение. Так, высоты менее 600 м, волнистая и изорванная граница облаков, затрудняют взлёт и особенно посадку самолётов и вертолётот. С низкой облачностью связано ухудшение видимости. В силу исключительной важности высоты нижней границы облаков нижнего яруса эта метеорологическая величина всегда привлекала к себе внимание исследователей и практиков. В настоящее время имеется целый ряд данных о нижней границе облаков нижнего яруса, причём в довольно большом диапазоне значений. Дело в том, что высота расположения низких облаков достаточно сильно зависит от притока тепла к подстилающей поверхности, поэтому эта величина проявляет отчётливую широтную, годовую и даже суточную изменчивость [2].

Само понятие нижняя граница облаков в различных источниках трактуется по-разному.

Нижняя граница облаков – уровень (поверхность) в атмосфере, на котором водность облака, если перемещаться внутри него по вертикали вниз, обращается в нуль [3].

Например, в работе Шаманаева В. С. выделяется 6 характерных точек в лидарном сигнале, которые можно принять за высоту нижней границы облачности при определенных критериях [4].

Существуют и другие определения высоты нижней границы облачности. Нижняя граница облаков определяется как самая нижняя зона, в которой

прозрачность от значений, соответствующих ясному небу или дымке, переходит к значениям, соответствующим совокупности водяных капель и кристаллов льда.

Высота нижней границы облаков (высоты нижней границы облачности) – расстояние по вертикали между поверхностью суши (воды) и нижней границей самого низкого слоя облаков. Разорванный и неустойчивый характер основания многих видов облаков не позволяет однозначно определить высоту нижней границы облаков. Невозможность четкого и однозначного определения нижней границы облаков создает трудности в контроле ее высоты. При контроле высоты нижней границы облаков облакомерами (прожекторы, светолокаторы, лазеры) фактически определяется расстояние от излучателя до светового пятна, возникающего в основании облака от светового потока, отправленного этим излучателем, яркость которого соответствует чувствительности приемного устройства облакомера. При тумане, снеге и других атмосферных явлениях контролируемое расстояние от передатчика до светового пятна принимается за вертикальную видимость [5].

В связи с этим важной задачей является анализ, обоснование и разработка требований к контролю высоты облаков с учетом принятой к использованию технологии метеорологического обеспечения взлета/посадки воздушных судов [6].

Также создание приборов контроля высоты облаков нового поколения требует не только разработки технических средств, но и проведения ряда экспериментальных исследований, связанных с разработкой алгоритмов работы прибора и его испытаниями в реальных метеорологических условиях.

**Объектом исследования** в работе являются аэрозольные образования в нижней тропосфере и взаимодействие с ними оптического излучения.

**Предмет исследования:** методы дистанционного контроля высоты нижней границы облачности, принципы работы приборов, реализующих эти методы.

**Целью диссертации** является разработка программно-аппаратного комплекса контроля высоты нижней границы облачности в диапазоне от 15 м до 2000 м в ближнем инфракрасном диапазоне длин волн с безопасным для глаз уровнем излучения.

Для достижения цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Провести анализ ограничений, присущих существующим системам контроля высоты нижней границы облачности;
2. Разработать схемы прибора контроля высоты нижней границы облачности исходя из условий минимальных габаритов и исключения использования общих оптических поверхностей излучателя и приёмного тракта при регистрации высоты нижней границы облачности в диапазоне от 15 м до 2000 м;
3. Разработать модель лидара для обоснования размеров элементов оптической схемы и выбора оптимальной базы между приёмопередающими каналами.
4. Разработать макет прибора контроля высоты нижней границы облачности;
5. Разработать методику юстировки макета прибора контроля высоты нижней границы облачности;
6. Разработать программу микропроцессора, которая занимается сбором, накоплением и первичной обработкой эхосигналов, по данным, полученным из аппаратных измерений с платы АЦП прибора контроля высоты нижней границы облачности;
7. Разработать программу обмена между прибором контроля высоты нижней границы облачности и компьютером, для передачи и быстрого сохранения полученных данных от прибора контроля высоты нижней границы облачности на ПК с целью дальнейшей обработки и расчета высоты нижней границы облачности;
8. Разработать программу определения высоты нижней границы облачности для обработки получаемых от прибора контроля высоты нижней границы облачности данных и выдачи обработанных результатов в текстовом и графическом виде;
9. Провести испытания разработанного макета прибора контроля высоты нижней границы облачности в условиях реальной атмосферы.

### **Научная новизна**

1. Разработан лидарный программно-аппаратный комплекс контроля высоты нижней границы облачности, построенный по биаксиальной оптической схеме, с безопасным для глаз уровнем интенсивности инфракрасного лазерного диода с габаритными размерами 590×340×168 мм и массой 13,5 кг, позволяющий определять высоту нижней границы облачности с пространственным разрешением до 7,5 м в диапазоне от 15 м до 2000 м.
2. Экспериментально установлено, что предложенный метод снижения фона в сигнале лидарного программно-аппаратного комплекса контроля высоты нижней границы облачности, в котором на вход усилителя подается с противоположным знаком значение вычисленного ранее фона, обеспечивает круглосуточное функционирование усилительного тракта без насыщения при использовании широкополосного оптического фильтра.
3. Разработаны способ и устройство для калибровки созданного лидарного программно-аппаратного комплекса контроля высоты нижней границы облачности, содержащее нормализованную катушку оптоволокна и два коллиматора, с юстировочными узлами, позволяющие производить калибровку и проверку функционирования лидарного программно-аппаратного комплекса контроля высоты нижней границы облачности в полевых условиях.
4. Показано, что метод определения высоты нижней границы облачности из лидарного сигнала, в котором за высоту нижней границы облачности принимается локальный максимум производной сигнала, позволяет восстанавливать информацию о высоте нижней границы облачности до 3 слоев облачности при соотношении сигнал-шум больше 10.
5. Разработан программный комплекс обработки лидарных сигналов, который позволяет получать, непрерывно накапливать и сохранять лидарные данные с частотой дискретизации 20 МГц, а также восстанавливать информацию о высоте нижней границы облачности из полученных данных, с учётом наклона прибора, высоты над уровнем земли.

### **Научная и практическая значимость работы**

В рамках диссертации разработан и реализован в виде действующего макета лидарный программно-аппаратный комплекс контроля высоты нижней границы облачности с габаритными размерами не более 590×340×168 мм и массой изделия не более 13,5 кг, позволяющий определять высоту нижней границы облачности с пространственным разрешением до 7,5 м в диапазоне от 15 м до 2000 м.

Результаты исследования были использованы при выполнении проектов «Лазерные, оптические и акустические технологии дистанционного изучения атмосферы» № 121031500341, «Развитие фундаментальных основ новых технологий обеспечения безопасности жизнедеятельности на основе интеграции мультимодальной радиоволновой и оптической дистанционной сенсорики, и искусственного интеллекта» № 075-15-2024-557, договора №331И/022-21.

### **Достоверность научных результатов**

Результаты диссертации получены с использованием современного технического оборудования. Мощность излучения регистрировалась поверенным измерителем средней мощности и энергии лазерного излучения ИМО-2Н. Спектры излучения регистрировались спектрометром Andor Shamrock 303 i (с разрешением 0,7 нм), с использованием световода Ocean Optics QP600-2-SR-BX. Изображения, полученные при юстировке, регистрировались видеокамерой HI-IPN200F10SW.

В работе использовались стандартные методы: анализ и синтез схемных решений, математическое моделирование геометрической функции прибора, измерение параметров геометрической функции в макете лидара, сопоставление результатов моделирования и эксперимента. Также о достоверности полученных результатов говорит их многократная воспроизводимость.

По результатам работы были сформулированы следующие **защищаемые положения, выносимые на защиту**:

1. Лидарный программно-аппаратный комплекс контроля высоты нижней границы облачности, построенный по биаксиальной оптической схеме, с лазерным диодом импульсной мощностью на уровне 70 Вт, длительностью импульса  $35 \pm 5$  нс, с центральной длиной волны близ 905 нм, позволяет определять высоты

нижней границы облачности в диапазоне от 15-100 м с погрешностью  $\pm 10$  м и в диапазоне 100-2000 м с погрешностью  $\pm 10$  % при отношении сигнал/шум больше 10.

2. Схемное решение АЦП-ЦАП с замкнутой цифровой обратной связью для вычитания фоновой составляющей из сигнала лавинного фотодиода при применении оптического фильтра с полосой пропускания 25 нм, соотношении сигнал/фон более 0.00001, обеспечивает функционирование усилительного тракта облакомера без насыщения при регистрации высоты нижней границы облачности от 15 до 2000 м.

3. Программный комплекс обработки лидарных сигналов позволяет восстанавливать информацию о высоте нижней границы облачности в диапазоне от 15 до 2000 м, до 3 слоев облачности при соотношении сигнал-шум больше 10.

### **Личный вклад автора**

Результаты, представленные в диссертации, составившие основу защищаемых положений, получены автором самостоятельно или при непосредственном участии. Автор принимал участие в изготовлении, разработке экспериментальных стендов для проведения исследований. Кроме того, автором выполнялась подготовка и проведение экспериментов, и обработка полученных результатов.

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертации были представлены на следующих конференциях и симпозиумах: X Международная школа молодых ученых «Физика окружающей среды» им. А.Г. Колесника. Россия, Томск, 2012; III Всероссийская научная конференция «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды», Санкт-Петербург, 2014; XXII Рабочая группа Аэрозоли Сибири, Томск, 2015; XXII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы», Томск, 2016; XXIII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы», Томск, 2017; XXIV Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы», Томск, 2018; XXV Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана.

Физика атмосферы», Новосибирск, 2019; XXVI Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы», Москва, 2020; XXIX Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы», Москва, 2023.

### **Публикации**

Результаты диссертационной работы представлены в научной печати в рецензируемых статьях и докладах на научных конференциях.

Список работ состоит из 18 публикаций, из них 3 статьи входят в базы данных Scopus и WoS, 2 статьи опубликовано в научных журналах, включенных в перечень ВАК. Материалы диссертации представлены на 7 международных и всероссийских конференциях. Оформлено 2 патента на полезную модель и 3 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **Структура диссертации**

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, изложены основные положения, выносимые на защиту, отмечена научная новизна и практическая значимость.

**В первой главе** изложено современное состояние проблемы контроля высоты нижней границы облачности, систематизированы знания об атмосфере Земли, типах облаков, приведен обзор лидарных систем и методов контроля высоты нижней границы облачности, а также основные сведения о современных системах контроля высоты нижней границы облачности.

**Во второй главе** приведен анализ и выбор оптической схемы лидарных приборов контроля высоты нижней границы облачности, показана математическая модель для геометрического расчёта биаксиальной оптической схемы прибора контроля высоты нижней границы облачности.

С учетом спектральных окон прозрачности атмосферы и производимых лазерных диодов в качестве излучателя было принято решение использовать лазерный диод с техническими характеристиками, приведёнными в таблице 1:

Таблица 1 - Характеристики лазерного диода SPL LL90\_3

| Параметр                    | Единица измерения | Значение |
|-----------------------------|-------------------|----------|
| Центральная длина волны     | нм                | 905      |
| Пиковая импульсная мощность | Вт                | 70       |
| Длительность импульса       | нс                | 40       |
| Размер апертуры             | мкм × мкм         | 200 × 10 |

В качестве детектора был выбран лавинный фотодиод серии С30902ЕН, фирмы Excelitas.

На основании характеристик этих детекторов, математической модели и информации о пределах контролируемой величины с использованием методики, предложенной в этой главе, можно произвести расчёт оптической схемы прибора.

Рисунок 1 отображает размеры изображения в фокальной плоскости приёмника в зависимости от дальности до зондируемого объёма.

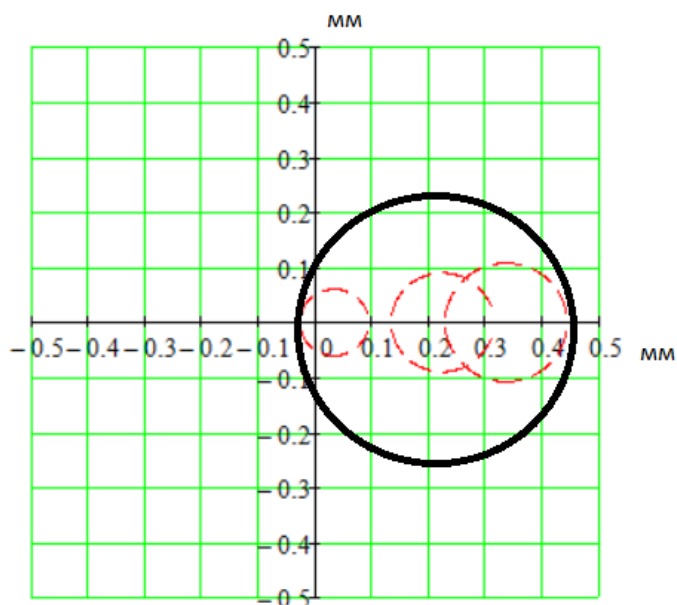
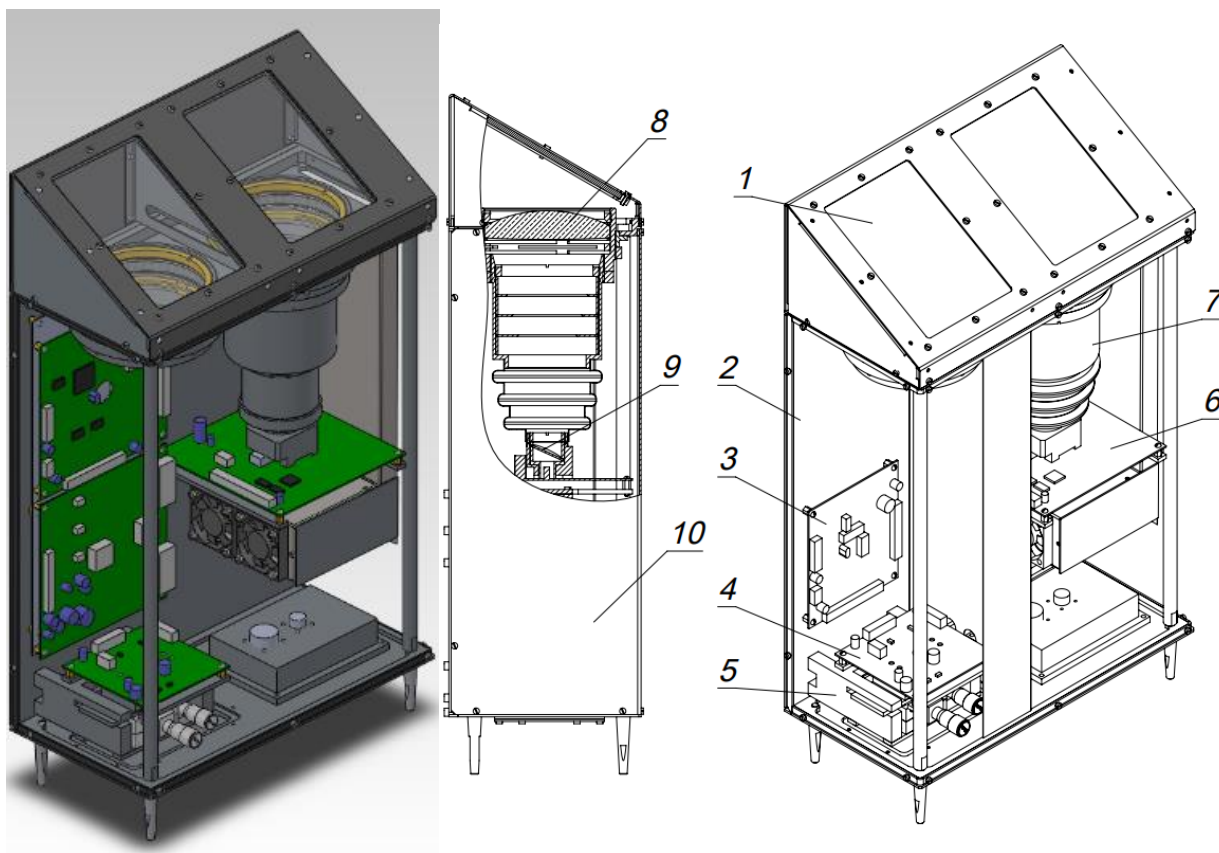


Рисунок 1 – Границы изображения в фокальной плоскости приёмной линзы в зависимости от дальности до зондируемого объёма (пунктир 2000 м, 300м, 100 м, широкая линия – полевая диафрагма)

Приведено описание конструкции разработанного прибора контроля высоты нижней границы облачности. На рисунках 2 и 3 показаны общий вид конструкции

макета прибора контроля высоты нижней границы облачности и расположения его основных элементов.



1 – защитное окно, 2 – корпус, 3 – плата процессора, 4 – плата управления излучателем, 5 – юстировочный столик, 6 – плата оцифровки сигналов фотоприемника, 7 – конус для защиты приёмного тракта от паразитной засветки внутри прибора, 8 – линза, 9 – интерференционный фильтр, 10 – крышка

Рисунок 2 – Трёхмерная модель, общий вид и расположение элементов в конструкции прибора контроля высоты нижней границы облачности

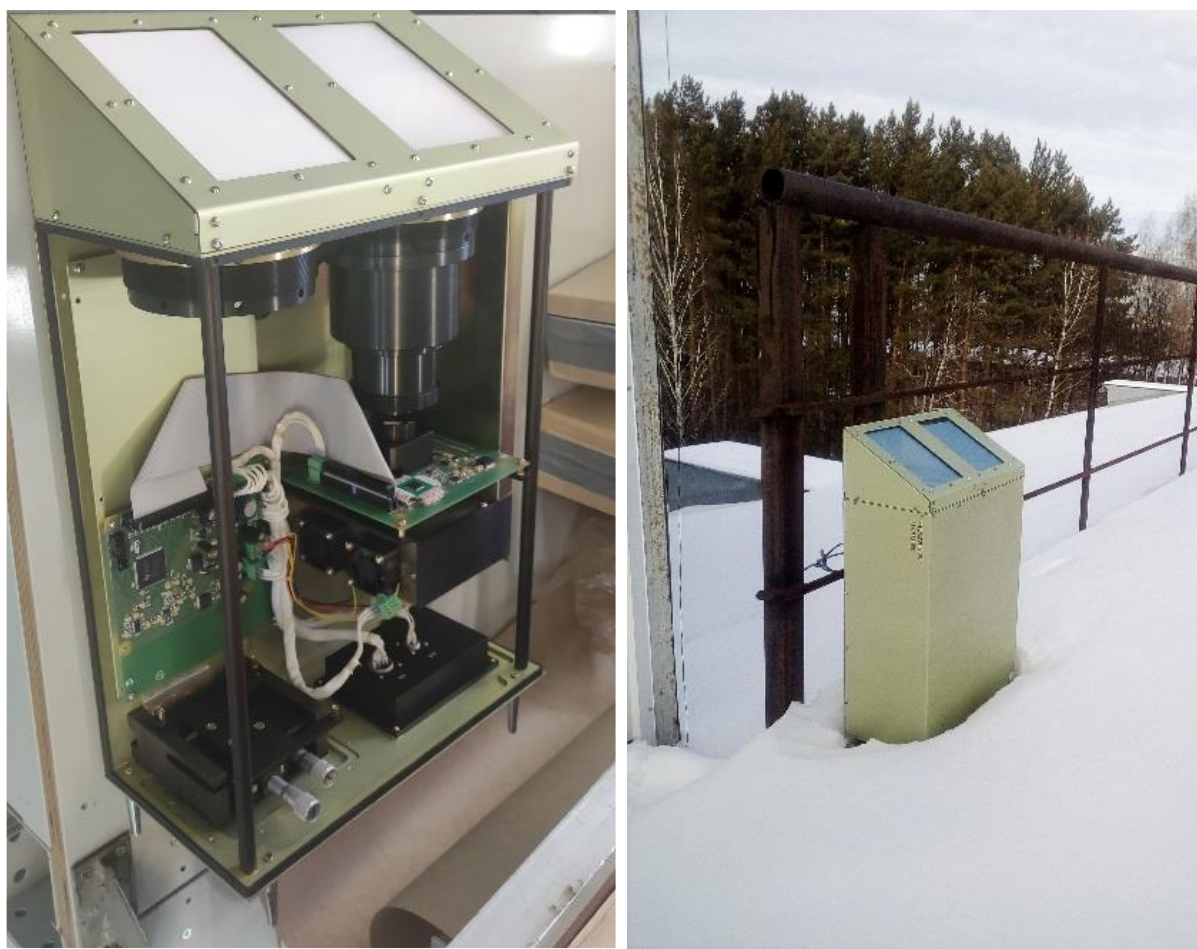


Рисунок 3 – Общий вид разработанного прибора контроля высоты нижней границы облачности: со снятой крышкой (слева) и на крыше ИОА СО РАН при приёмо-сдаточных испытаниях образца (справа)

Приведены процедуры юстировки и калибровки прибора контроля высоты нижней границы облачности. Рисунок 4 показывает состав поверочного комплекта прибора контроля высоты нижней границы облачности, внешний вид и упаковку для поверочного комплекта прибора контроля высоты нижней границы облачности.



Рисунок 4 – Состав поверочного комплекта

Поверка или калибровка по предложенному методу позволяет осуществлять её в широком диапазоне дальностей (от нескольких метров до десятков километров) без особых затруднений. Также требования к персоналу и его квалификации существенно ниже, чем у других методик, при этом прибор контроля высоты нижней границы облачности может оставаться на месте своей эксплуатации. Применение современных оптоволоконных технологий позволяет легко осуществить имитацию нескольких слоёв облачности (использовав несколько линий задержки и ослабитель между ними [7]). В конце главы приведены основные выводы.

**В третьей главе** описаны особенности обработки и приёма сигнала, при использовании полупроводниковых лазерных диодов в оптоэлектронных приборах, связанные с избыточным поступлением фонового излучения на вход прибора контроля высоты нижней границы облачности.

На рисунке 5 приведены типичные спектры яркости дневного безоблачного и облачного неба.

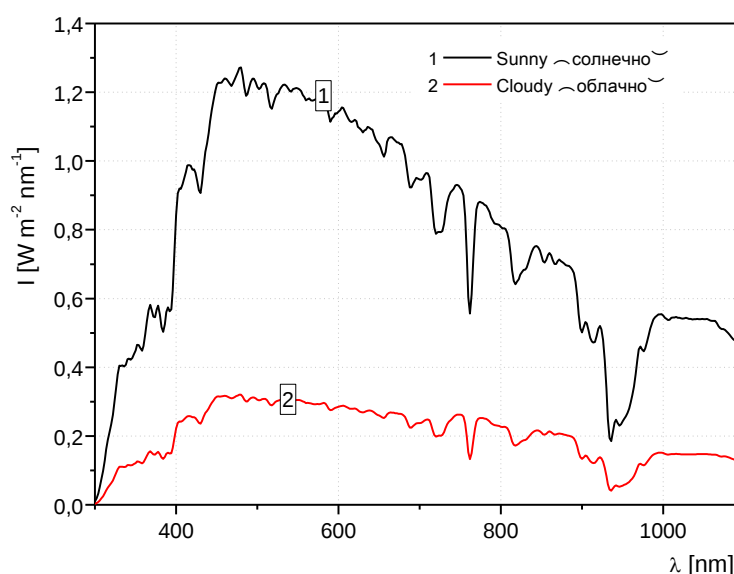


Рисунок 5 – Типичные спектры яркости дневного неба: 1) спектр яркости дневного безоблачного неба 2) спектр яркости дневного облачного неба

Результаты измерения спектров семи лазерных диодов из одной партии поставки приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение лазерных диодов SPL LL90\_3

| № изделия | Центральная длина волны, нм | Спектральная ширина линии на полувысоте интенсивности, нм |
|-----------|-----------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 1         | 903,1                       | 2,80                                                      |
| 2         | 904,0                       | 2,77                                                      |
| 3         | 907,9                       | 11,8                                                      |
| 4         | 900,9                       | 4,64                                                      |
| 5         | 901,4                       | 2,65                                                      |
| 6         | 909,3                       | 3,31                                                      |
| 7         | 904,6                       | 2,69                                                      |

Из сравнения спектральных характеристик лазера и фильтра возможна ситуация, при которой центр линии излучения лазера будет расположен на длине волны 900,9 нм, а центр полосы пропускания фильтра – 904,4 нм (рисунок 6).

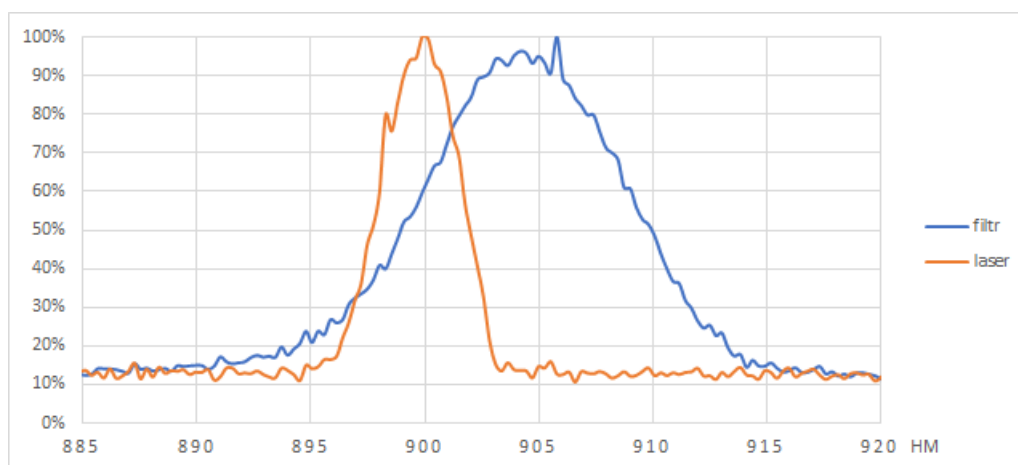


Рисунок 6 – Спектры диода SPL LL90\_3 и пропускания фильтра «905nm Bandpass Interference Filter FWHM 10 nm» фирмы Edmund Optics

Отсюда следует, что при работе прибора будет использоваться не более 10% приходящего излучения. Поэтому, чтобы можно было использовать лазерные диоды без предварительной выбраковки, нужно использовать фильтр с пропусканием шириной не менее 25 нм.

Чтобы обеспечить работу оптических приборов для определения характеристик атмосферы, необходимо фильтровать фоновую составляющую сигнала. Оптические способы фильтрации фона заключаются в минимизации угла приёма излучения путём установки оптических фильтров и затворов. С фоновым излучением, попавшим на фотодетектор, приходится бороться уже в электронной части.

В электронной части фон может быть отсечён при помощи частотной фильтрации, выборки данных синхронно с импульсным излучателем и другими методами. Однако, если фон превысит динамический диапазон приёмного тракта, то извлечение сигнала из фона не представляется возможным. Для сжатия динамического диапазона сигнала, поступающего на вход усилителей, был разработан и апробирован способ уменьшения фона в сигнале прибора контроля высоты нижней границы облачности.

Схема приёмной части лидара с устройством уменьшения фона приведена на рисунке 7.

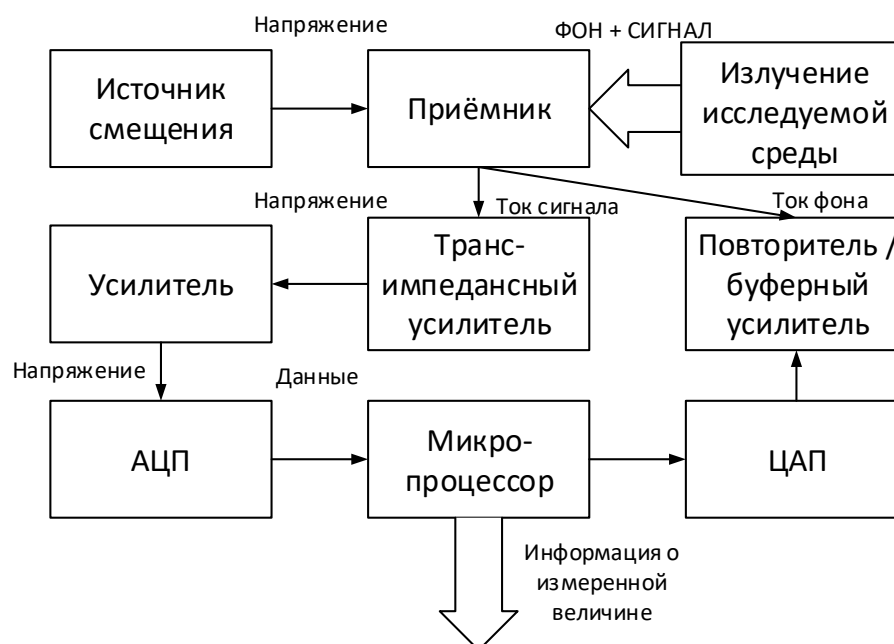


Рисунок 7 – Схема приёмной части лидара с устройством уменьшения фона

Предложенное решение позволяет снизить требования к оптическим фильтрам системы и при этом сохранить динамический диапазон. При этом нужно учитывать динамический диапазон самого приёмника, который не должен превышать.

Таким образом, разработано устройство уменьшения влияния фоновой засветки на приёмный тракт приборов контроля высоты нижней границы облачности, с замкнутой цифровой обратной связью через АЦП-ЦАП и постоянной времени равной периоду модуляции зондирующего излучения, при использовании приёмника с токовым выходом и соотношением  $\frac{\text{сигнал}}{\text{фон}}$  до  $10^{-5}$ .

**В четвёртой главе** описан разработанный программный комплекс для обработки лидарных сигналов и восстановления информации о высоте нижней границы облачности. Для функционирования прибора контроля высоты нижней границы облачности разработан программный комплекс, который состоит из 3 программ:

- Программа микропроцессора, которая занимается сбором, накоплением и первичной обработкой эхо-сигналов, по данным, полученным из аппаратных измерений с платы АЦП прибора контроля высоты нижней границы облачности;

- Программа обмена между прибором контроля высоты нижней границы облачности и компьютером, основное назначение которой состоит в передаче и быстром сохранении полученных данных от прибора контроля высоты нижней границы облачности на персональном компьютере с целью дальнейшей обработки и расчета высоты нижней границы облачности;
- Программа контроля высоты нижней границы облачности. Область применения программы – визуализация результатов расчетов. Основное назначение программы – обработка получаемых от прибора контроля высоты нижней границы облачности данных. Программа предназначена для сбора данных, их обработки для получения высоты облачности и выдачи обработанных данных в текстовом и графическом виде в соответствующих файлах.

Информация о наличии или отсутствии облачности записывается в файл, который обновляется после каждого сеанса. Кроме того, информация записывается в виде графика. Пример записи приведен на рисунке 8.

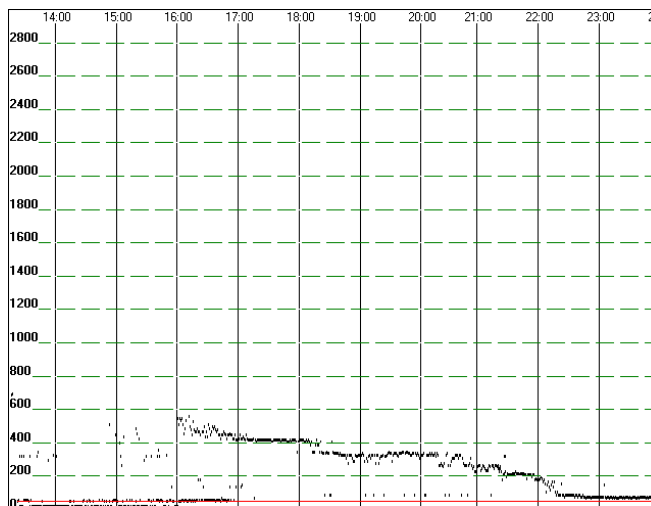


Рисунок 8 – Пример записи графического файла

**В заключении** сформулированы выводы и перечислены основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Разработан лидарный программно-аппаратный комплекс контроля высоты нижней границы облачности, построенный по биаксиальной оптической схеме, с безопасным для глаз инфракрасным лазерным диодом с импульсной мощностью

на уровне 70 Вт, длительностью импульса  $(35 \pm 5)$  нс, с центральной длиной волны близ 905 нм, позволяющий определять высоту нижней границы облачности с пространственным разрешением до 7,5 м в диапазоне от 15 м до 2000 м.

Предложено и создано схемное решение АЦП-ЦАП с замкнутой цифровой обратной связью для вычитания фоновой составляющей из сигнала лавинного фотодиода при применении оптического фильтра с полосой пропускания 25 нм, соотношении сигнал/фон более 0.00001, которое обеспечивает круглосуточное функционирование усилительного тракта без насыщения при использовании широкополосного оптического фильтра.

Установлено, что при использовании оптического фильтра шириной 25 нм и схемного решения уменьшения фона в сигнале, прибор функционирует при изменении уровня фона на 5 порядков.

Разработан программный комплекс обработки лидарных сигналов, который позволяет получать, непрерывно накапливать и сохранять лидарные данные с частотой дискретизации 20 МГц, а также восстанавливать информацию о высоте нижней границы облачности из полученных данных, с учётом наклона прибора, высоты над уровнем земли.

Показано, что метод определения высоты нижней границы облачности из лидарных сигналов, в котором за высоту нижней границы облачности принимается локальный максимум производной сигнала, превышающий пороговое значение, позволяет восстанавливать информацию о высоте нижней границы облачности до 3 слоев облачности при соотношении сигнал-шум больше 10.

Разработан способ и оптоволоконное устройство для калибровки созданного прибора контроля высоты нижней границы облачности.

### **Список основных работ, опубликованных по теме диссертации**

#### **Публикации в журналах, индексируемых в Scopus**

1. Grishin A.I. and **Kryuchkov A.V.** Lidar Observations of Atmospheric Optical Characteristics during Sichuan Earthquake. // Atmospheric and Oceanic Optics, 2018, V. 31. No. 03. pp. 269–272.

2. Matvienko G.G., Babushkin P.A., Bobrovnikov S.M., Borovoi A.G., Bochkovskii D.A., Galileiskii V.P., Grishin A.I., Dolgii S.I., Elizarov A.I., Kokarev D.V., Konoshonkin A.V., **Kryuchkov A.V.**, Kustova N.V., Nevzorov A.V., Marichev V.N., Morozov A.M., Oshlakov V.K., Romanovskii O.A., Sukhanov A.Ya., Trifonov D.A., Yakovlev S.V., Sadovnikov S.A., Nevzorov A.A. and Kharchenko O.V. Laser and Optical Sounding of the Atmosphere // Atmospheric and Oceanic Optics, 2020, V. 33. No. 01. pp. 51–68.
3. Galileiskii V.P., Grishin A.I., Elizarov A.I., **Kryuchkov A.V.**, Matvienko G.G., Morozov A.M. Experimental Study of the Reflection of Light Radiation from Crystalline Particles in the Lower Troposphere // Atmospheric and Oceanic Optics, 2023, V. 36. No. 01. pp. 41–46.

#### **Статьи в журналах из списка ВАК**

1. Гришин А. И., **Крючков А. В.** Лазерный измеритель высоты нижней границы облачности, безопасный для глаз // Приборы и техника эксперимента. 2013. № 4. С. 142-143.
2. Гришин А. И., **Крючков А. В.** Измеритель высоты нижней границы облачности // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 6. С. 143-144.

#### **Прочие журналы**

1. Гришин А. И., **Крючков А. В.** Измерения характеристик атмосферы лидарным и нефелометрическими методами. // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 02. С. 156–159. DOI: 10.15372/AOO20180212.

#### **Публикации в материалах конференций**

1. Imitation of several layers of clouds to calibrate ceilometer / A. I. Grishin, **A. V. Kryuchkov**, G. G. Matvienko // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, Tomsk, 30 июня – 03 2016 года. Vol. 10035. – Tomsk: SPIE, 2016. – P. 100354P. – DOI 10.1117/12.2249365.
2. Optimization parameters of ceilometer / **A. V. Kryuchkov**, A. I. Grishin // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, Tomsk, 22–26 июня 2015 года. Vol. 9680. – Tomsk: SPIE, 2015. – P. 968052. – DOI 10.1117/12.2205996.

3. Calibration and verification portable ceilometer / **A. V. Kryuchkov**, A. I. Grishin // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, Tomsk, 22–26 июня 2015 года. Vol. 9680. – Tomsk: SPIE, 2015. – P. 96804V. – DOI 10.1117/12.2205982
4. Possibility of heating safety glasses in optoelectronic devices / A. I. Grishin, **A.V. Kryuchkov** // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, Tomsk, 30 июня – 03 2016 года. Vol. 10035. – Tomsk: SPIE, 2016. – P. 100354N. – DOI 10.1117/12.2249371
5. Registration system pulse mode avalanche photodiode photon counting with RS-485 interface / **A. V. Kryuchkov**, A. I. Nadeev // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, Tomsk, 30 июня – 03 2016 года. Vol. 10035. – Tomsk: SPIE, 2016. – P. 100354L. – DOI 10.1117/12.2249367
6. Methods of determining the height of the lower border of clouds from the lidar signal / A. I. Grishin, **A. V. Kryuchkov**, G. G. Matvienko // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, Tomsk, 02–05 июля 2018 года. Vol. 10833. – Tomsk: SPIE, 2018. – P. 1083367. – DOI 10.1117/12.2504641
7. Portable eye-safe ceilometer / **A. V. Kryuchkov**, A. I. Grishin, A. N. Gricuta, Proc. SPIE 9292, 20th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 92923A (25 November 2014); doi: 10.1117/12.2075286

### **Результаты интеллектуальной деятельности**

1. **Крючков А.В.**, Гришин А.И., Матвиенко Г.Г. Измеритель параметров облаков с совмещённой передающей системой // Патент на полезную модель №187812 от 19.03.2019. Правообладатель: ИОА СО РАН (RU).
2. **Крючков А.В.**, Гришин А.И., Матвиенко Г.Г. Измеритель параметров облаков с оптоволоконным приёмопередающим трактом // Патент на полезную модель №187227 зарегистрирован 25.02.2019. Правообладатель: ИОА СО РАН (RU).
3. Гришин А.И., **Крючков А.В.**, Филатов В.В. Программа для сбора, конвертации и архивирования данных от измерителя параметров облаков (ИПО) // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 622071900068-5 от 19.07.2022. Правообладатель: ИОА СО РАН (RU).

4. Гришин А.И., **Крючков А.В.**, Филатов В.В. Программа обработки лидарных сигналов измерителя параметров облаков (ИПО) // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 622071900067-8 от 19.07.2022. Правообладатель: ИОА СО РАН (RU).
5. Гришин А.И., **Крючков А.В.**, Филатов В.В. Программа определения высоты нижней границы облачности из лидарных сигналов, полученных от измерителя параметров облаков (ИПО) // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 622071900066-1 от 19.07.2022. Правообладатель: ИОА СО РАН (RU).

### Список литературы

1. Беляков, А. Инструктивный материал по теме “Метеоминимумы” / А. Беляков. — Текст : электронный // Учебно-тренировочный центр виртуальной авиации «Ростов» : [сайт]. — URL: [https://training.urrv.ru/wp-content/uploads/2015/12/weather\\_minimums.pdf](https://training.urrv.ru/wp-content/uploads/2015/12/weather_minimums.pdf) (дата обращения: 20.05.2024).
2. Рыбакова, Ж. В. Облака и их трансформация / Ж. В. Рыбакова. — Томск : Издательский Дом Томского государственного университета, 2020. — 234 с. — Текст : непосредственный.
3. Мамонтова, Л. И. Метеорологический словарь / Л. И. Мамонтова, С.П Хромов. — Ленинград : Гидрометеиздат, 1974. — 568 с. — Текст : непосредственный.
4. Шаманаев, В. С. Высота нижней границы облачности по результатам лазерного зондирования / В. С. Шаманаев. — Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Физика. — 2014. — № 6. — С. 51-56.
5. Толмачева Методы и средства гидрометеорологических измерений (для метеорологов): учеб. пособие / Толмачева, И. Н. — Пермь : Пермский университет, 2011. — 223 с. — Текст : непосредственный.
6. Григоров, Н. О. Методы и средства гидрометеорологических измерений. Метеорологические приборы. / Н. О. Григоров, А. Г. Саенко, К. Л. Восканян. — Санкт-Петербург : издательство РГГМУ, 2012. — 306 с. — Текст : непосредственный.

7. Kryuchkov, A. V. Calibration and verification portable ceilometer / A. V. Kryuchkov, A. I. Grishin. — Текст : непосредственный // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, Tomsk, 22–26 июня 2015 года. Vol. 9680. — Tomsk : SPIE, 2015. — С. 96804.

## Приложение А

### Сравнение характеристик разработанного комплекса с существующими аналогичными приборами

| Страна          | Марка               | Габариты, мм | Диапазон измерений, м | Излучатель       | Масса, кг | Класс защитного исполнения | Автоматический обдув/обогрев окна | Безопасность для глаз |
|-----------------|---------------------|--------------|-----------------------|------------------|-----------|----------------------------|-----------------------------------|-----------------------|
| Финляндия       | CL31                | 1190×335×325 | 0-7500                | 910 нм           | 32        | IP65                       | есть                              | Класс 1М              |
| Германия        | CHM 15k „NIMBUS“    | 500×500×1550 | 5-15000               | Nd: YAG, 1064 нм | 70        | IP65                       | есть                              | Класс 1М              |
| Велико-британия | SkyVUE 8            | 737×294×240  | 0-8000                | InGaAs 912 нм    | 18        | IP65                       | есть                              | Класс 1М              |
| Франция         | R-Man 510           | 1150×800×650 | 15-15000              | Nd:YAG 355 нм    | 105       | IP65                       | есть                              | -                     |
| СССР            | ДВО-2               | 610×570×600  | 15-2000               | импульсная лампа | 70×2 + 9  | IP65                       | -                                 | -                     |
| Германия        | CBME80              | 468×408×234  | 0-7500                | -                | 15        | IP65                       | есть                              | Класс 1М              |
| РФ              | SKYDEX              | 860 × Ø530   | 0-7500                | 1535 нм          | 30        | IP65                       | есть                              | -                     |
| США             | CS135               | 1000×330×316 | 0-10000               | 912 нм (±5 нм)   | 32        | IP66                       | есть                              | Класс 1М              |
| РФ              | Разработанный 1Б69М | 560×150×420  | 15-2000               | 905 нм           | 13,2      | IP65                       | есть                              | Класс 1М              |