



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Экспериментальной физики атмосферы

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему «Использование технологии Lidar для измерения нижней границы облаков»

Исполнитель

Шабанов Рауф Эльчинович

(фамилия, имя, отчество)

Руководитель

кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Восканян Карина Левановна

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Восканян Карина Левановна

(фамилия, имя, отчество)

«14» июня 2024 г.

Санкт-Петербург

2024

СОДЕРЖАНИЕ

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ.....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ДАТЧИКА LIDAR	5
ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ВЫСОТЫ НГО	18
ГЛАВА 3. ОБРАБОТКА И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ ВЫСОТЫ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ ОБЛАЧНОСТИ (ООО «ИРАМ»).....	24
3.1 Дискретность данных, полученных с датчиков КРАМС – 4.....	24
3.2 Проверка рядов ВНГО на ООО «ИРАМ» на пропуски и выбросы	26
3.3 Фильтрация нулей (ясная атмосфера)	26
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	39

Введение

Актуальность темы настоящей работы обусловлена тем обстоятельством, что определение высоты нижней границы облачности является одним из наиболее важных процедур, выполняемых инженером-метеорологом, техником-синоптиком или каким-либо другим профессионалом в сфере метеорологической науки и иных Наук о Земле.

Облачность — крайне многогранное метеорологическое явление: она может дать исследователю и специалисту обширную информацию о прошедшей погоде, о погоде настоящей или в сверхкраткосрочной и краткосрочной перспективах, о погоде в относительно продолжительной перспективе. Вся эта информация носит исключительную важность, ибо, например, для формирования метеорологических прогнозов облачности, специалисту важно располагать наибольшим объемом информации о прошедшей и настоящей погоде, дабы прогноз оказался оправдавшимся, и уже потребители метеоинформации приняли верные и эффективные действия, основываясь на имеющемся прогнозе.

Однако в силу своей многогранности и сложности для наблюдения (как было упомянуто выше), для обнаружения внутренних облачных процессов, примитивных способов наблюдения (например, визуально) зачастую оказывается мало, а потому приходится прибегать к более продвинутому методу наблюдения за облачностью. Одним из таких методов зондирования атмосферы являются системы LiDAR.

Сегодня спектр применения лазеров огромен и универсален: начиная от смартфонов и планшетов, заканчивая космическими поисками. Несомненно, это только начало. Существует огромное количество способов и инструментов для использования лазеров для производства, создания, сбора, эффективного и умелого поиска во многих сферах человеческой деятельности: в технологической сфере, в медицине, в науках о Земле и других и так далее.

В данной работе рассматриваются вопросы использования датчиков LiDAR для получения данных о высоте нижней границы облачности. Проведен анализ данных, полученных одним из таких датчиков, находящимся на территории экспериментального полигона ООО «ИРАМ». Именно такие датчики входят в состав комплексной радиотехнической аэродромной метеорологической станции КРАМС-4, используемой для метеорологического обеспечения безопасности полетов (как в малой, так и в большой авиации).

В работе рассмотрены особенности обработки и интерпретации данных по высоте нижней границы облачности и опробована методика интерпретации данных лидарных измерений. Сформулирована соответствующая рекомендация.

Целью выпускной квалификационной работы является проведение комплексного анализа данных, зафиксированных датчиком, принцип работы которого основан на технологии LiDAR.

В начале работы изучены теоретические основы и физические принципы работы датчика LiDAR, а также теоретические основы знаний об облачности и, в частности, высоты нижней границы облачности.

Выявлена возможность повышения эффективности процесса анализа данных, путем автоматизации процесса;

Опробирована методика, предлагаемая для более эффективной обработки и интерпретации данных по ВНГО.

1 Теоретические основы и физические принципы работы датчика LiDAR

1.1 История технологии LiDAR

LiDAR (Light Detection and Ranging) – представляет собой технологию дистанционного зондирования, в которой используется свет (лазер, источник индуцированного излучения) для измерения расстояний до различных объектов. Имея данные о расстояниях от источника излучения до различных объектов в пространстве, например, появляется возможность построить виртуальную пространственную модель (картину) среды.

Идея LiDAR возникла в 1950-х годах. Тогда ученые начали использовать лазеры для измерения расстояний до спутников. Но будет справедливым отметить, что первые применения LiDAR пришлись на геодезию, топографию и картографию. Впрочем, и на сегодняшний день технология LiDAR играет важную роль в этих областях науки.

Эта технология получила гигантский скачок в своем развитии во времена Холодной войны (в рамках космических программ СССР и США). Действительно, большинство дистанционных методов зондирования атмосферы с помощью лазерного излучения разрабатываются в последней трети прошлого столетия. В этот период в качестве инструментов для реализации изложенных выше методов использовались лазерные лидары (взаимодействие с атмосферными частицами, такими как атомы, молекулы, аэрозоли). От лабораторных установок до мобильных прототипов наземного и воздушного базирования различного назначения был пройден долгий путь.

С течением времени технология LiDAR стала широко использоваться в различных областях, таких как геодезия, археология, геология, аэронавигация, а также в промышленности, автомобильной промышленности и даже в робототехнике.

Одним из самых известных применений LiDAR в настоящее время является его использование в автономных автомобилях. LiDAR позволяет

автомобилям создавать трехмерные карты окружающей среды и обнаруживать препятствия на дороге.

Сейчас технология LiDAR продолжает развиваться, и ее применение становится все более широким благодаря улучшению точности измерений и снижению стоимости оборудования.

1.2 Теоретические основы и физические принципы работы датчика

Изначально идея изучать атмосферу, используя такое незамысловатое для нас, современных людей, явление как свет, возникла еще до начала Второй Мировой войны. Самым началом истории создания лазеров можно считать 1916 год, когда не нуждающийся в представлении учёный Альберт Эйнштейн в своих теоретических работах предсказал способность некоторых атомов осуществлять моделируемое эмиссионное воздействие вынужденного излучения. Это явление представляет собой физическую основу, на которой работают все лазеры, и оно совершенно по своей сути.

Эйнштейн предсказал, что могут существовать квантовые системы, такие как атомы, молекулы и ядра, которые могут переходить в особое возбужденное состояние под воздействием фотона света.

Возбужденный атом может действовать двумя разными способами[1]:

Первый — когда атом через некоторое время самостоятельно возвращается в спокойное состояние. Важно отметить, что время обычно очень короткое — всего несколько десятков наносекунд. И при этом переходе атом излучает фотон с определенной длиной волны[1].

Второй путь, когда в этот возбужденный атом попадает еще один фотон. При этом он как бы выбивает второй фотон из возбужденного атома и тогда они летят парами[1].

Интересно то, что это не просто два разных фотона. Они абсолютно одинаковы, они обладают одинаковыми параметрами. [3]

Свет распространяется по пространству волнами, а расстояние между пиковыми точками каждой волны называется длиной волны.

Новый, созданный фотон имеет ту же энергию, фазу, поляризацию, а также направление распространения, что и исходный фотон, который не поглощается. Это явление называется когерентностью (рис. 1.1).[3,4]

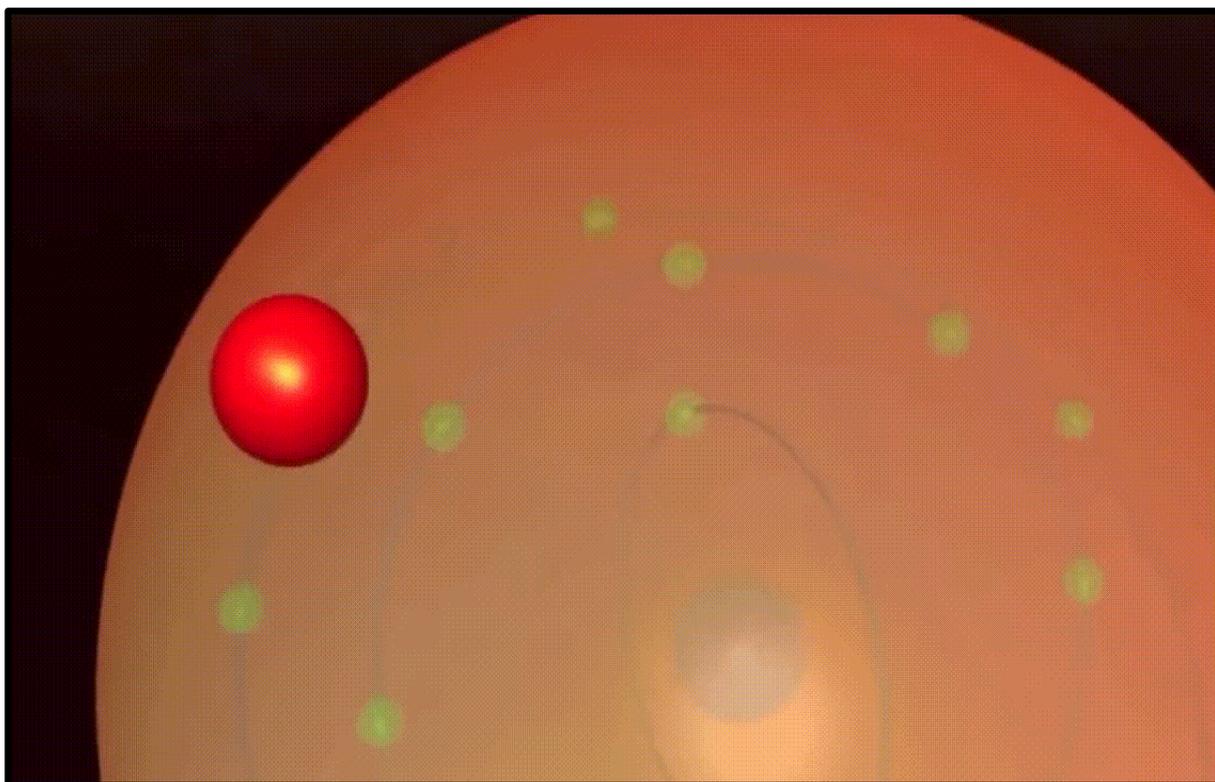


Рисунок 1.1 – Эффект когерентности

В результате эти фотоны парой летят дальше, пока не встретят новый возбужденный атом и так далее. Происходит что-то вроде лавинного эффекта.

Когда летит луч фотонов, появляется продолжение формирования еще большего количества фотонов-близнецов, и все они летят в одном направлении. Не все материалы могут демонстрировать такой эффект возбуждения, но, как правило, их довольно много – это могут быть кристаллы с полупроводниками, жидкости и некоторые газы (рис. 1.2). Например, углекислый газ, — мы знаем углекислый лазер, один из самых эффективных.

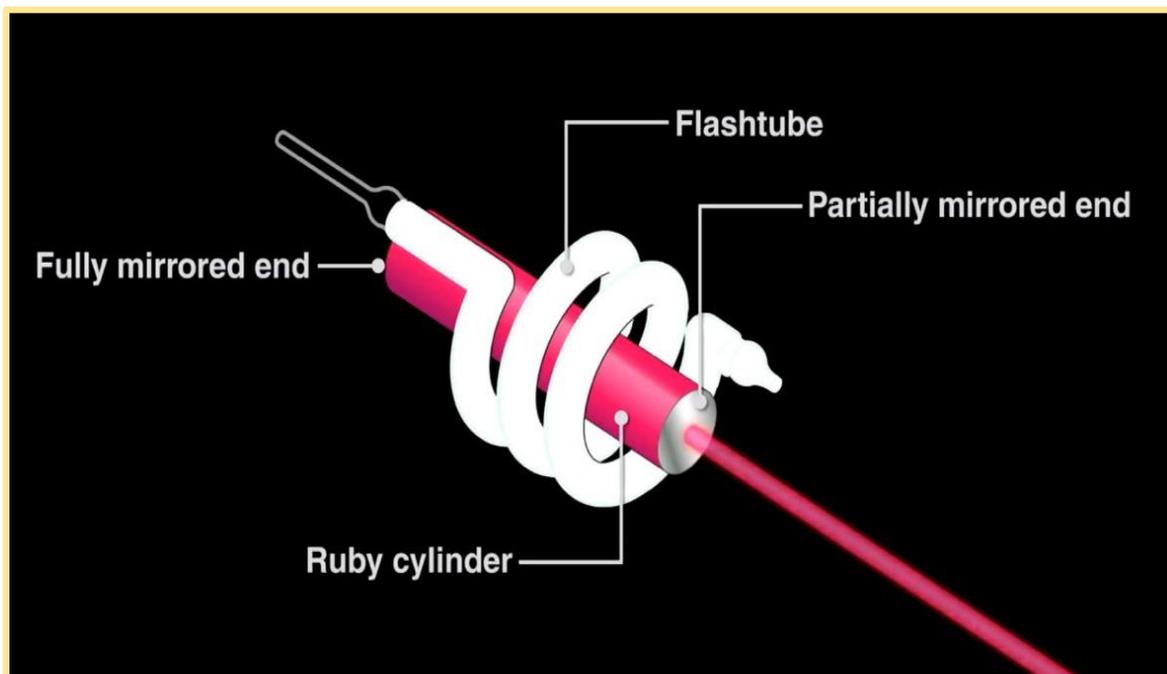


Рисунок 1.2 – Схема кристаллического элемента

Все эти материалы излучают фотоны с определёнными параметрами. Они могут различаться по мощности, длине волны, а, следовательно, цвету, а также быть постоянными или импульсными.

Конечно, несмотря на то, что пучки фотонов четко направлены, вначале они все равно могут двигаться в противоположных направлениях. Тогда в чем же причина, почему лазеры так сильно светят и луч почти не рассеивается, если изначально все светится во все стороны? Зеркала могут стать эффективным решением для этой задачи.

По сути, «лавина» одинаковых фотонов заключена в бесконечный цикл отражений от одной стенки цилиндра к другой (рис. 1.3). И он работает как усилитель излучения. Лавина фотонов перелетает от одного края цилиндра к другому, генерируя все больше таких же фотонов.

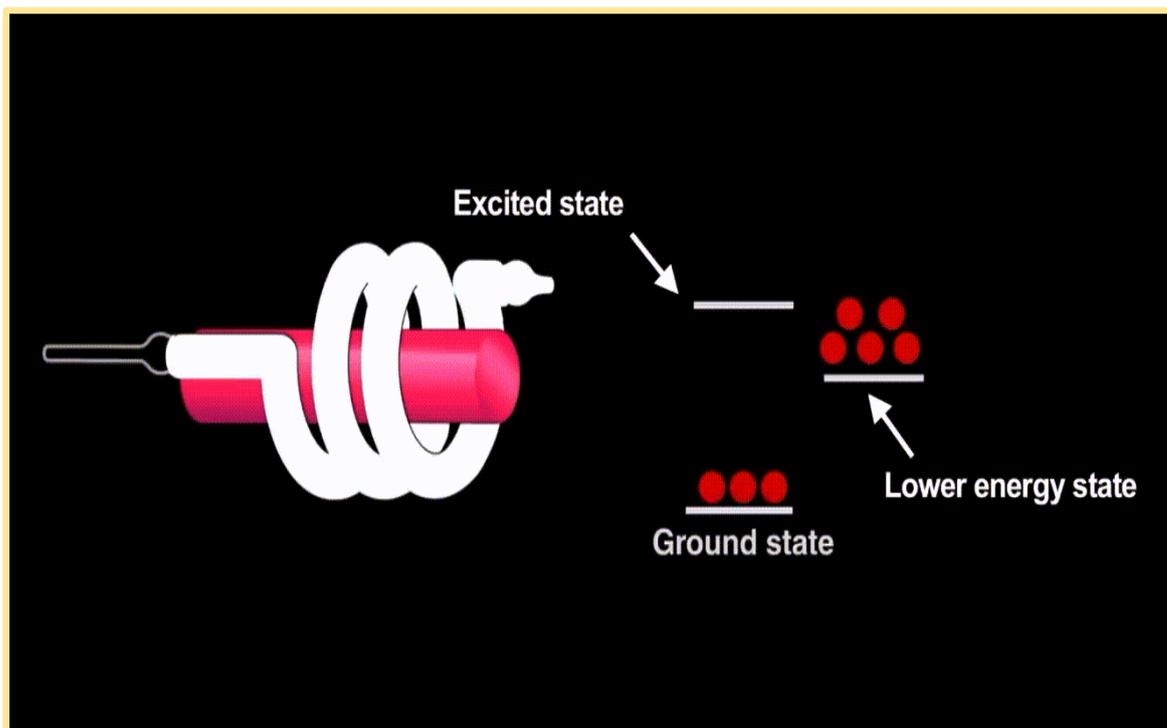


Рисунок 1.3 – Лавинный эффект

Все летящие фотоны от зеркала к зеркалу создают просто бесконечное количество одинаковых двойников, а те, что изначально вылетают из цилиндра, просто рассеиваются. Зеркала в системе немного отличаются (рис. 1.4). Одно полностью отражает падающий свет (Зеркало полного отражения), а второе (Зеркало частично отражающее) может пропускать небольшую часть этого света. [5]

Такая система позволяет получать на выходе лазера узкосфокусированный, когерентный и монохромный свет. Стоит отметить, что лазер не может начать работать сам по себе, поэтому существуют разные варианты дать первоначальный толчок фотонной лавине. Это называется начальной накачкой. Источники бывают самые разные – чаще всего это электрический разряд. [2]

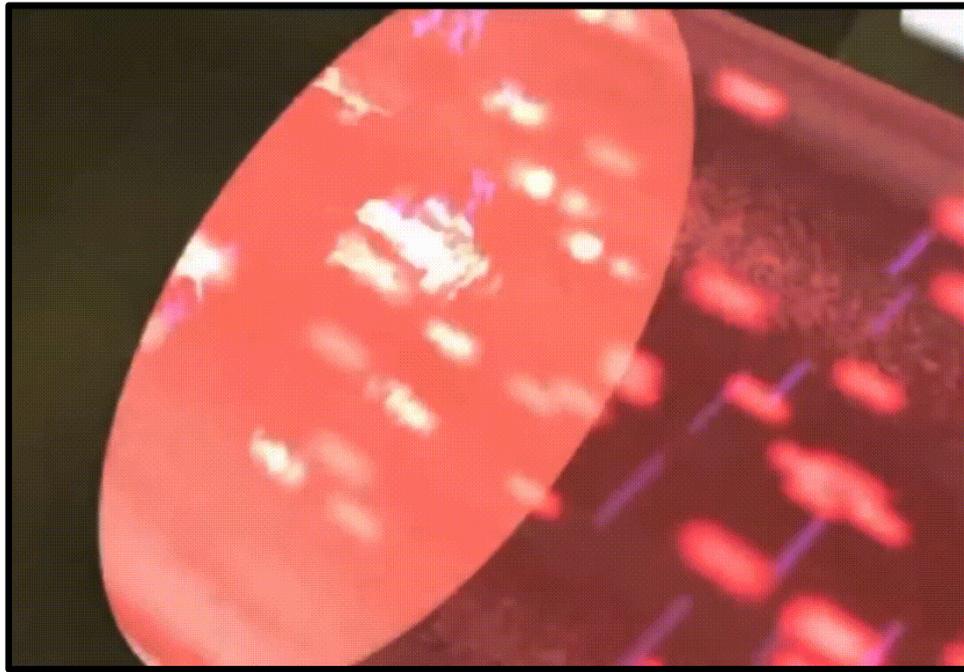


Рисунок 1.4 – Одно из отражающих зеркал

Источником также могут служить определенные химические реакции или другой менее мощный лазер, в зависимости от области применения и требований к конструкции устройства. [1]

В основе Лидаров лежит кристалл или кристаллический кластер (примерами могут послужить лидары серии SRI (производства Соединенных Штатов Америки) или советские приборы серии «ЛОЗА»). Часто приходится говорить о применении лазеров на основе рубина и YAG: Nd³⁺ (иттрий-алюминиевый кристалл [Yttrium-aluminum garnet]). Интеграция YAG в систему обеспечила снижение энергопотребления за счет иттрий-алюминиевого кристалла и ионов Nd³⁺, поглощающих достаточное количество энергии.

Одним из преимуществ использования полупроводниковых лазерных диодов вместо импульсных газоразрядных ламп (они зачастую использовались в ранних версиях приборов для светового зондирования атмосферы и предках LiDAR) для накачки твердотельных лазеров является снижение энергопотребления и, как следствие, уменьшение массы, размеров электронных блоков питания и управления лазером, а также источников его питания.

Система таким образом получается более компактной, а значит и более мобильной (нет особого смысла упоминать об удобстве использования, это тоже очевидно преимущество). Кроме того, за счет значительного снижения тепловыделения в источнике излучения накачки и активном элементе в большинстве случаев можно отказаться от жидкостного охлаждения лазерных элементов.

Тем не менее, длина волны существующих мощных лазерных диодных излучателей (рис. 1.5) весьма существенно зависит от температуры гетеротранзистора лазерного диода, которая лишь меняется (помним также о вкладе в нее саморазогревающегося гетеротранзистора). [3],[4]



Рисунок 1.5 – Лазерный диод

Таким образом, изменение температуры гетеротранзистора на 100 °С приводит к смещению спектральной линии излучения примерно на 25 мкм. В то же время в обычной области накачки в районе 808 мкм типичная ширина линии интенсивного поглощения иона Nd³⁺ в кристалле YAG составляет ~1 мкм. Из-за этого возникает необходимость термической стабилизации диодов лазерной накачки, что приводит к значительному увеличению веса, габаритов и

энергопотребления устройств (то есть мы теряем мобильность, а также проигрываем в энергоэффективности).[1,2]

На рисунке 1.6 представлены результаты разработки и исследования малогабаритного YAG:Nd³⁺-лазера с низким энергопотреблением и энергией моноимпульсов более 20 мДж при частоте их перемещения (в циклическом режиме работы) 20 Гц.[3]

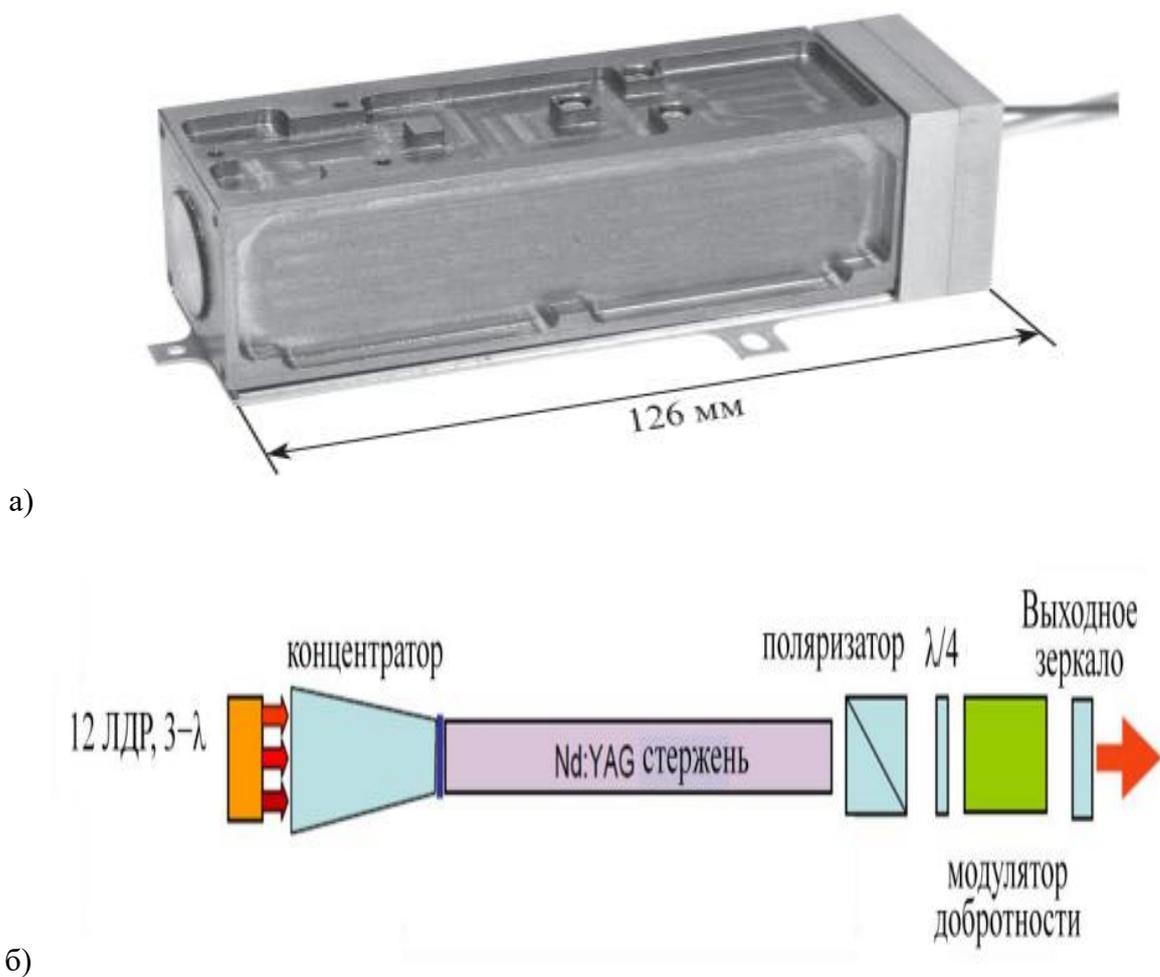


Рисунок 1.6 – Излучатель YAG лазера Nd³⁺

а) внешний вид; б) схема

Лазер работает в широком диапазоне температур без использования термостабилизации диодов лазерной накачки. Принципиальную возможность отказа от термостабилизации демонстрирует, на котором показан спектр

поглощения в кристалле YAG (рис. 1.7): Nd³⁺ в районе интенсивной линии с длиной волны 808 мкм, которую обычно используют для полупроводниковой накачки[4].

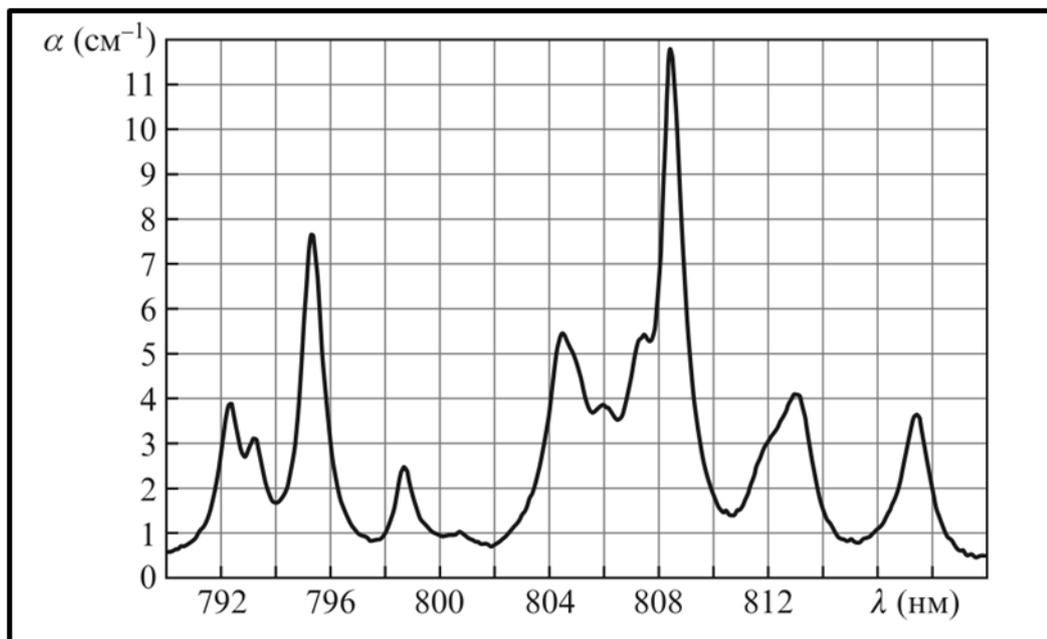


Рисунок 1.7 – Спектр поглощения в кристалле YAG

1.3 LiDAR в метеорологических измерениях

Сегодня лазерные технологии широко используются в системах мониторинга, в том числе для дистанционных измерений параметров атмосферы, моря и земной поверхности.

Применение лидаров позволяет получить большой объем информации о состоянии и составе исследуемого объекта с высоким временным и пространственным разрешением, что позволяет использовать их при

- измерении параметров атмосферы со спутников, в том числе температуры,
- для определения газового состава атмосферы и загрязняющих атмосферу веществ,

- для определения параметров ветра и облачности,
- для обеспечения безопасности полетов,
- в научных исследованиях и др.

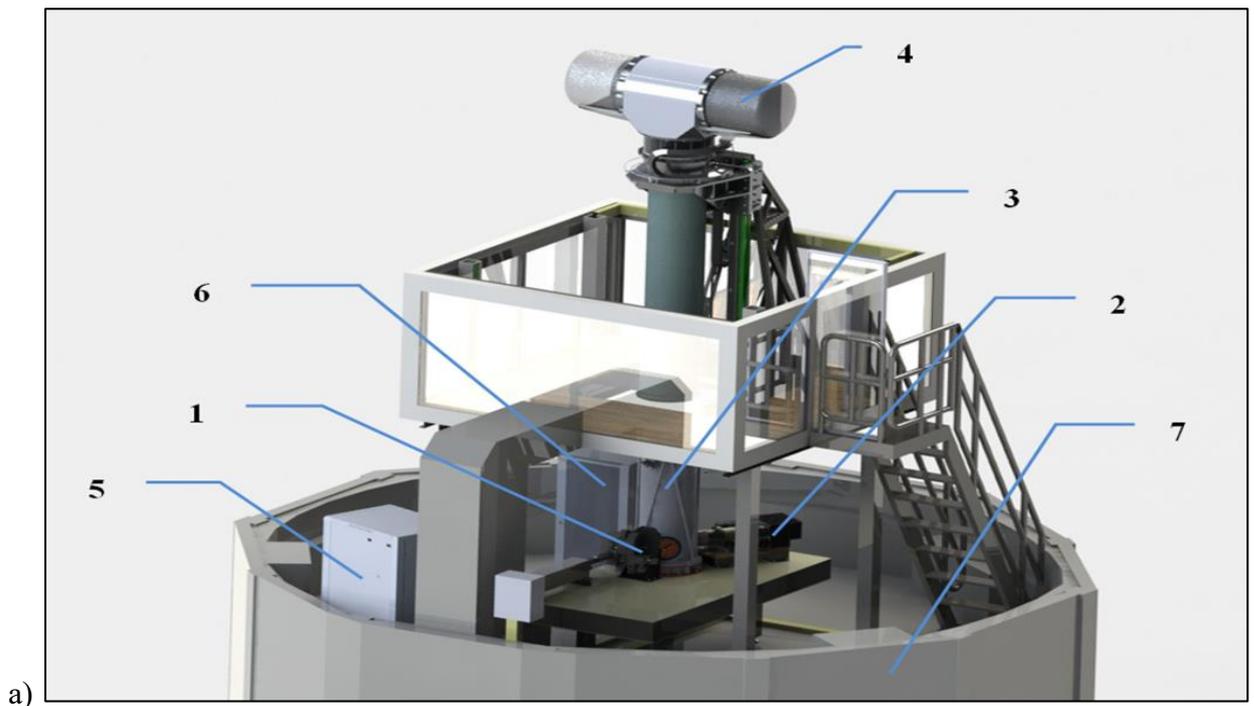
Основные типы систем LiDAR и области их применения в метеорологии показаны в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Основные типы систем LiDAR и области их применения в метеорологии

Процесс взаимодействия	Тип лидара	Получаемые данные для анализа
Рассеяние Ми на аэрозоле и облаках	Аэрозольный лидар	Аэрозоли и облака: геометрия, толщина
Деполяризация на несферических частицах	Поляризационный лидар	Тип облаков, пыль
Доплеровский сдвиг на аэрозолях	Доплеровский сдвиг на аэрозолях	Ветер, турбулентность
Рэлеевское (молекулярное) рассеяние на молекулах	Молекулярный лидар	Температура, ветер
Поглощение атомами и молекулами	Лидар дифференциального поглощения (DIAL)	Химические загрязнения, озон, влажность
Флуоресценция	Флуоресцентный лидар	Исследование биомассы

Когерентные доплеровские лидары позволяют определять поля ветра на разных высотах, распределение параметров облачности, данные о видимости. В качестве примера приведем импульсный доплеровский лидар, работающий в «Обсерватории экологической безопасности» СПбГУ на Васильевском острове (рис. 1.8).



а)



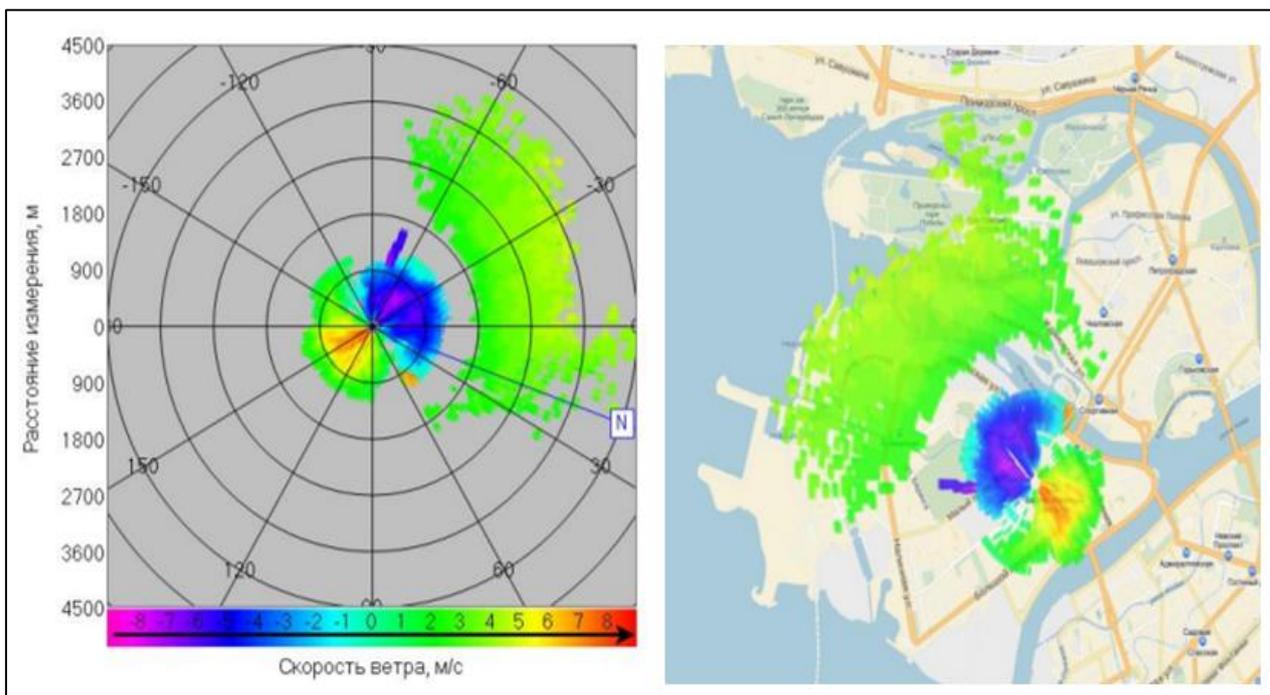
б)

Рисунок 1.8 – Импульсный доплеровский лидар

а) состав; б) место установки

1 – аэрозольный лидар; 2 – доплеровский лидар; 3 – телескоп приёмо-
 передающий; 4 – сканер двухосевой; 5 – шкаф серверный;
 6 – шкаф с оборудованием; 7 – башня СПбГУ

Данные измерений поступают в виде цветной карты с градациями цвета. Пример использования данных о ветровом режиме по результатам лидарного сканирования показан на рисунке 1.9.



а)

б)

Рисунок 1.9 – Пример представления данных о ветровом режиме по результатам лидарного сканирования

а) бланк с градациями цвета; б) наложение на карту района

Лидарные комплексы, в том числе мобильные, позволяют решать задачи мониторинга загрязняющих веществ, например определение концентрации аэрозоля (рис. 1.10).

К сожалению уровень использования лидаров на данный момент не очень высок, что объясняется прежде всего несколькими основными причинами:

- большие размеры,
- высокая стоимость,
- сложность интерпритации данных измерений.

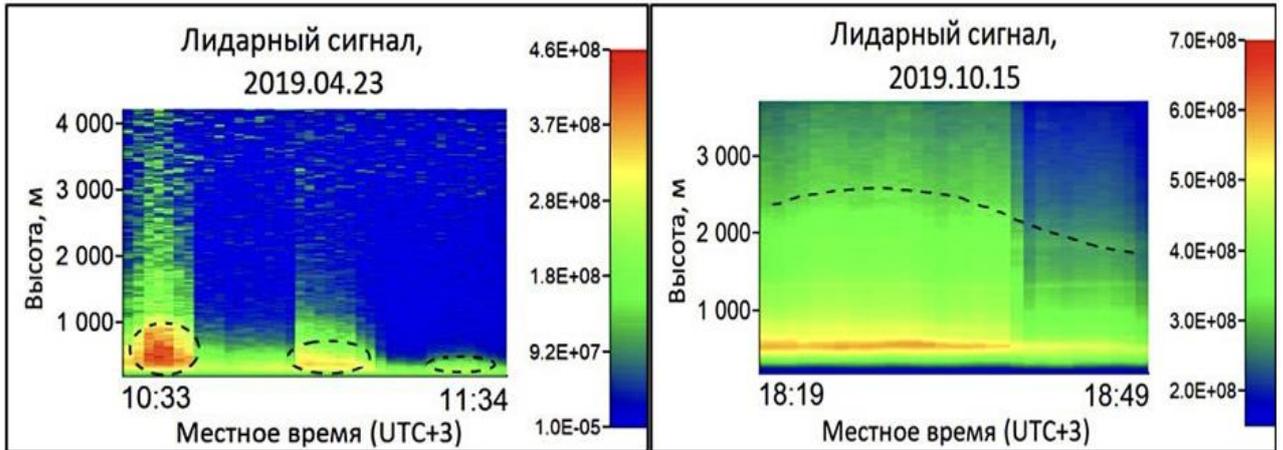


Рисунок 1.10 – Пример лидарных измерений концентрации аэрозоля

В данной работе речь пойдет об одно из наиболее часто используемых лидаров в метеорологии – измерения высоты нижней границы облаков с использованием лазерной импульсной технологии LiDAR, на котором основана работа облакомера CL31, используемого в составе комплексной радиотехнической аэродромной метеорологической станцией КРАМС-4.

2. Методика обработки высоты НГО

Ранее уже упоминался очевидный факт: на обеспечение безопасности полетов авиации влияет множество метеорологических факторов, явлений, однако влияние облачности и высоты нижней границы облачности, в частности, особенно значительно, и это при учете того, что современные аэропорты и аэродромы оснащены огромным количеством современных приборов и оборудования. [10]

Методика исследования временных рядов наблюдения облачности отлична от методик исследования, например, температуры или влажности воздуха. Для репрезентации методики анализа временного ряда ВНГО, будут использоваться данные, полученные с датчика CL31 (рис. 2.1). Такой датчик установлен на экспериментальном полигоне ООО «ИРАМ» (рис. 2.2).



Рисунок 2.1 – CL31, внешний вид



Рисунок 2.2 – ИРАМ экспериментальная площадка

Массив данных по всем значимым для обеспечения полетов метеопараметрам, предоставляемых КРАМС-4, очень объемный, а также данные обладают высокой степенью дискретности, что неудивительно, ведь показания датчиков выводятся по четыре раза в течение минуты (рис. 2.3). Таким образом за одни сутки мы получим по 7,5 тысяч значений. [13]

01-01-2021; Канал CL31; Датчик 017; Архив высоты облаков ; ВПП: I

Время	H1,м	H2,м	H3,м	W,м	2 MIN,м	Сост CRC
00:00:06	60.0	//////	//////	//////	50.0	HOPMA ce6
00:00:21	60.0	//////	//////	//////	50.0	HOPMA ce3
00:00:36	60.0	//////	//////	//////	50.0	HOPMA ce9
00:00:51	50.0	//////	//////	//////	50.0	HOPMA ce5
00:01:06	70.0	220.0	//////	70.0	50.0	HOPMA ccb
00:01:21	70.0	270.0	//////	70.0	50.0	HOPMA ccd
00:01:36	70.0	230.0	//////	70.0	50.0	HOPMA ccf
00:01:51	80.0	220.0	//////	80.0	60.0	HOPMA cce
00:02:06	50.0	//////	//////	//////	50.0	HOPMA ce7
00:02:21	50.0	//////	//////	//////	50.0	HOPMA ce4
00:02:36	70.0	230.0	//////	70.0	50.0	HOPMA cd0
00:02:51	70.0	220.0	//////	70.0	50.0	HOPMA ccc
00:03:06	70.0	220.0	//////	70.0	50.0	HOPMA ccd
00:03:21	50.0	//////	//////	//////	50.0	HOPMA ce5
00:03:36	50.0	//////	//////	//////	50.0	HOPMA ceb
00:03:51	70.0	210.0	//////	70.0	50.0	HOPMA ccc
00:04:06	70.0	220.0	//////	70.0	50.0	HOPMA cce
00:04:21	70.0	230.0	//////	70.0	50.0	HOPMA ccc
00:04:36	70.0	240.0	//////	70.0	50.0	HOPMA cd3
00:04:51	60.0	//////	//////	//////	50.0	HOPMA cea
00:05:06	50.0	//////	//////	//////	50.0	HOPMA cea
00:05:21	50.0	//////	//////	//////	50.0	HOPMA ce7
00:05:36	70.0	210.0	//////	70.0	50.0	HOPMA cd1
00:05:52	40.0	//////	//////	//////	50.0	HOPMA cea
00:06:06	70.0	210.0	//////	70.0	50.0	HOPMA ccf
00:06:21	70.0	210.0	//////	70.0	50.0	HOPMA ccc

Рисунок 2.3 – Данные по НГО

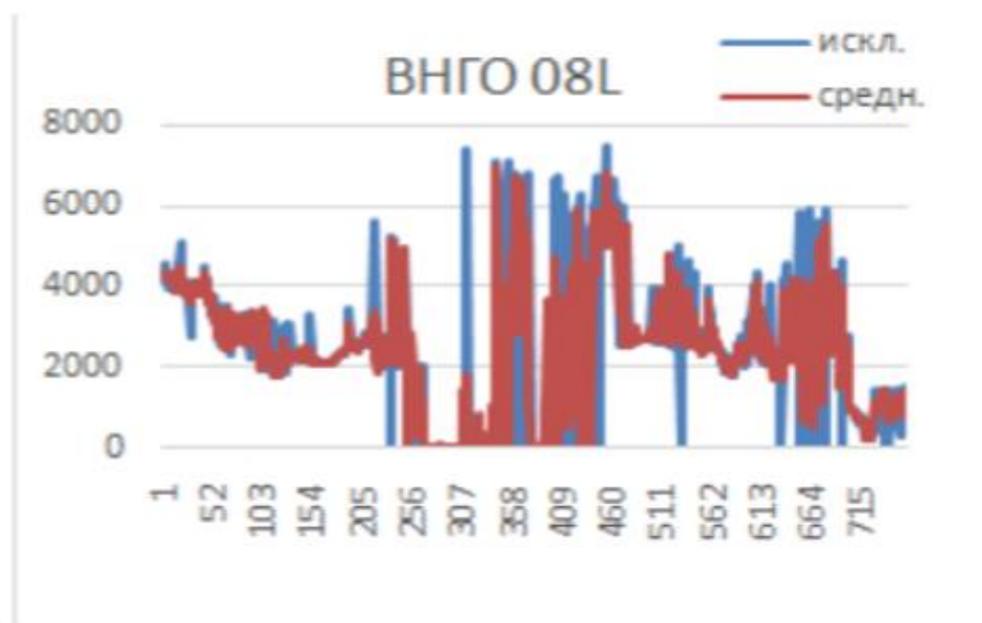
Алгоритм обработки данных следующий:

- уменьшение дискретности;
- проверка на наличие разрывов и выбросов в исходных данных.

Пример сокращения дискретности данных до 5 минут приведен на рисунке 2.4. Внешний вид ряда при этом визуально не изменяется, а количество измерений сокращается с 14 тысяч значений до 715, что гораздо удобнее для восприятия и дальнейшей обработки значений НГО.



а)

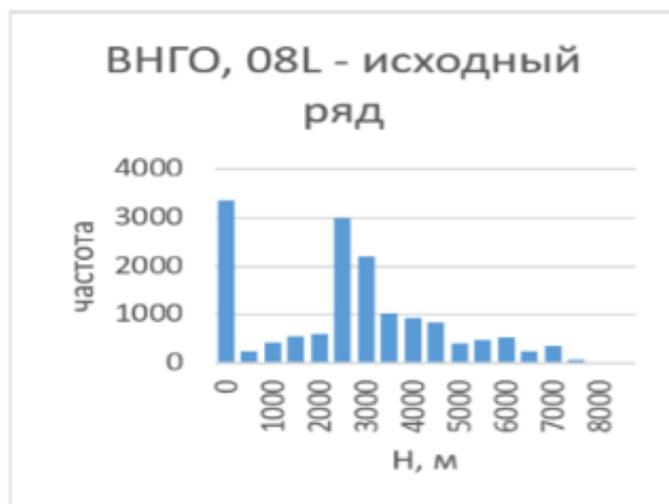


б)

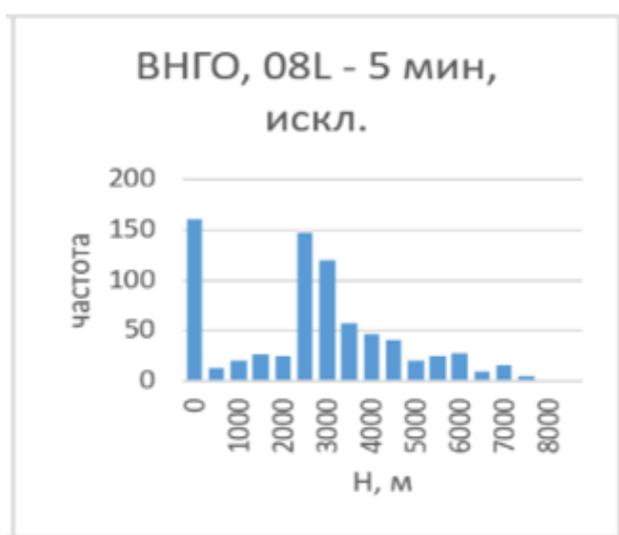
Рисунок 2.4 – Пример сокращения дискретности значений НГО

а) дискретность 15 с; б) дискретность 5 мин

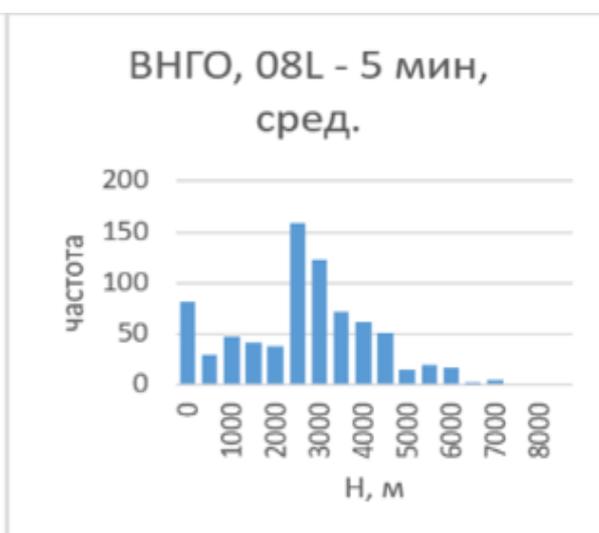
Пример гистограмм распределения значений до и после изменения дискретности (рис. 2.5) двумя методами показывает аналогичность распределения значений, что подтверждает возможность изменения периодичности данных перед обработкой.



а)



б)



в)

Рисунок 2.4 – Распределение НГО

- а) дискретность 15 с; б) дискретность 5 мин сокращение первым методом;
в) дискретность 5 мин сокращение вторым методом

Методика первичного контроля значений НГО на тоже имеет свою специфику: ведь при наличии безоблачного неба CL31 фиксирует значение «0». В случае с НГО это значение будет и визуально (рис. 2.5) и при автоматизированной проверке восприниматься как выброс, в связи с большим

отличием значения «0» от соседних значений (даже от высоты облаков нижнего яруса).



Рисунок 2.5 – Пример представления значений НГО с нулевыми значениями

Поэтому рекомендуется удаление значений «0» из ряда данных перед дальнейшей обработкой.[13]

И это объяснимо, поскольку для метеобеспечения авиации гораздо важнее знать значение НГО, чтобы обезопасить безаварийную и безопасную эксплуатацию самолетов, радоваться безоблачному небу.

3 Обработка и интерпретация данных высоты нижней границы облачности (ООО «ИРАМ»)

Перейдем к работе с данными временных рядов высоты нижней границы облачности. Проверим результат использования методики на действительных данных.

Особенности исследования временных рядов облачности упомянуты.

- облачность может быть многослойной, мы можем наблюдать облачность всех ярусов.
- кроме того, в нашем случае облачность достаточно часто чередуется с безоблачным небом. [13]

3.1 Дискретность данных, полученных с датчика НГО

Датчики КРАМС-4 дают огромный массив данных по всем важным для обеспечения полетов авиации метеорологическим параметрам с высокой дискретностью. В частности, для ВНГО показания датчиков выводятся каждые 15 секунд. Таким образом, за исследуемый период (двое суток) количество измерений составило 11519 измерений.

Поскольку период полученных данных небольшой, то и количество значений не столь велико и программные пакеты позволяют их обрабатывать достаточно быстро. В связи с этим было принято решение не менять периодичность измерений.

3.1 Фильтрация значений безоблачного неба

Визуально оценивая данные, было несложно увидеть огромное количество значений ВНГО, равное нулю, что позволяет нам говорить о ясном небе. По датчику визуально обозначается меньшее количество

значений безоблачного неба. В дальнейшем остановимся на показаниях данного датчика подробнее.

Посмотрим базовые статистические характеристики по всем четырем датчикам, полученные после обработки в Excel с помощью инструмента «анализ данных» (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Характеристика ряда высоты нижней границы облачности по серединам двух сезонов

	Зима	Лето
среднее	548	2722
стандартная ошибка	19	15
мода	0	0
стандартное отклонение	347	1019
интервал	1850	4340
минимум	0	0
максимум	1850	4340
счет	11519	11519

Таблица с данными расчетов подтверждает, что в оба сезона значение моды равно нулю, что соответствует безоблачному небу.

Так же мы видим, что среднее значение по двум сезонам года разнятся практически в 4 раза: по датчику среднее значение ВНГО выше летом (2722 м), тогда как по датчику зимой – 548 метров. При этом максимальное значение ВНГО сильно разнится. В нашем случае, в зимний период чаще наблюдалась облачность нижнего и среднего ярусов, а в летний – среднего и высокого. Кроме

того, такая разница в средних значениях может быть связана, как раз, с меньшим количеством замеров безоблачного неба зимой, что характерно для района Санкт-Петербурга и Ленинградской области. В дальнейшем мы исследуем данный момент.

Значение моды, равной нулю во обоих случаях указывает на то, что отсутствие облачности в исследуемом ряду встречается чаще любых других значений. Это обстоятельство указывает на то, что для получения статистических характеристик, иллюстрирующих, в частности, изменчивость высоты нижней границы облаков около среднего его значения в исследуемом ряду, необходимо исключить все значения ВНГО, равные 0.[14] Для этого следует сократить дисперсию.

3.2 Интерпритация значений ВНГО с экспериментального полигона ИРАМ

Далее проводится физический анализ данных, для проведения которого необходимо исключить все значения высоты нижней границы облачности, равные «0» (случай ясного неба).

Следует этот анализ проводить на втором этапе обработки данных по ВНГО, если нет необходимости подсчета количества сроков, в которые небо было ясным. Это поможет избежать лишних действий, когда анализируем подозрительные на наличие выбросов участки.

3.3 Фильтрация нулей (ясная атмосфера)

На данном этапе проведем физический анализ данных, для проведения которого необходимо исключить все значения ВНГО, равные «0» (случай безоблачной атмосферы). Для этого воспользуемся программой, написанной на кафедре экспериментальной физики атмосферы РГГМУ.

На рисунке 3.1 представлены временные ряды до и после исключения данных, полученных при отсутствии облачности в зимний период наблюдений.

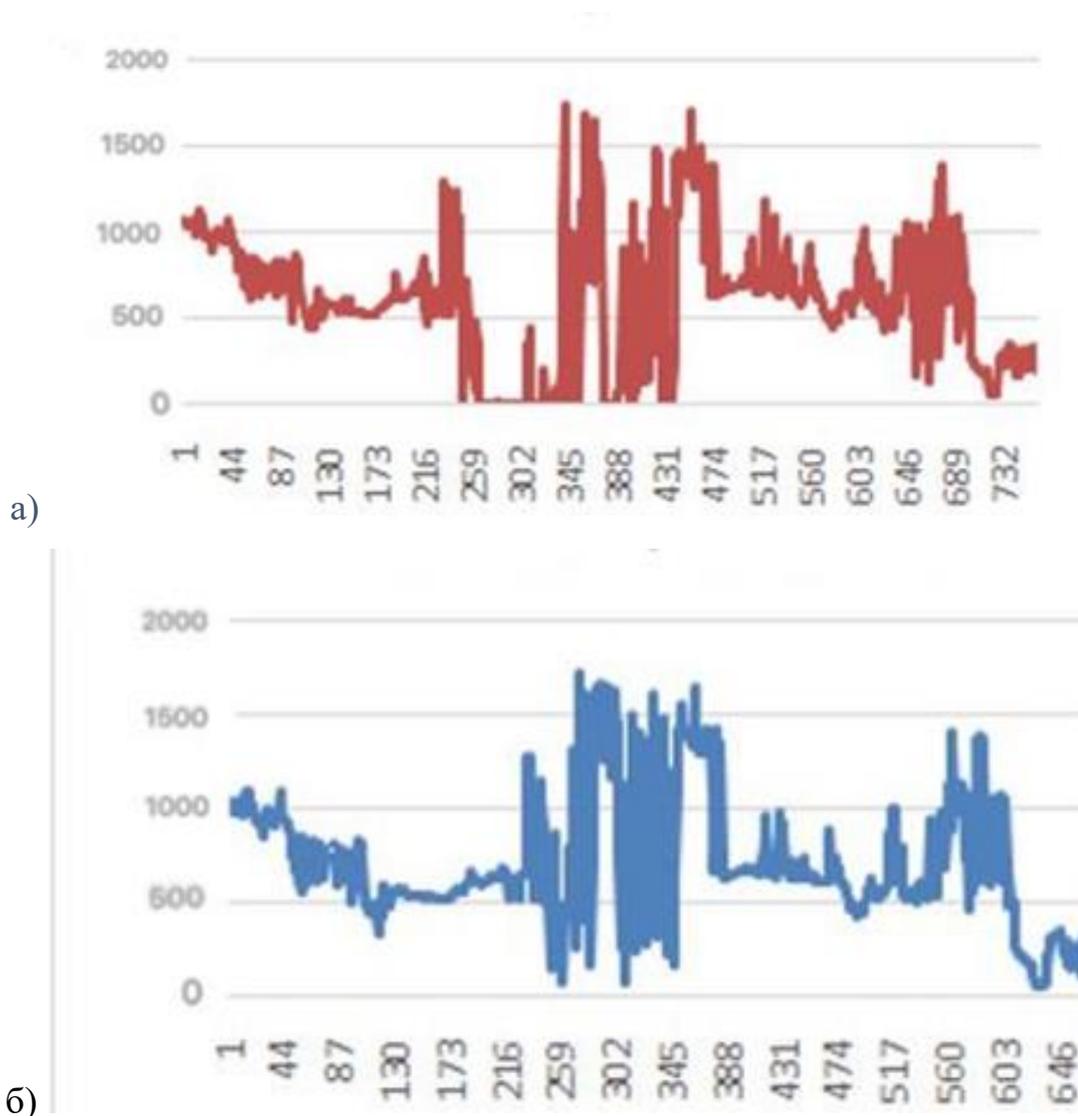


Рисунок 3.1 – Графики хода измерений НГО для зимних дней, а) до фильтрации нулей, б) после фильтрации

Из графиков для зимнего месяца видно, что по факту наблюдается только облачность нижнего яруса с разрывами [11]. Особенно хорошо видна такая облачность с 125 по 220 и с 360 по 510 измерение с последующим опусканием облачности.

На рисунке 3.2 представлены данные CL31 до и после исключения данных, полученных при отсутствии облачности в зимний период наблюдений.

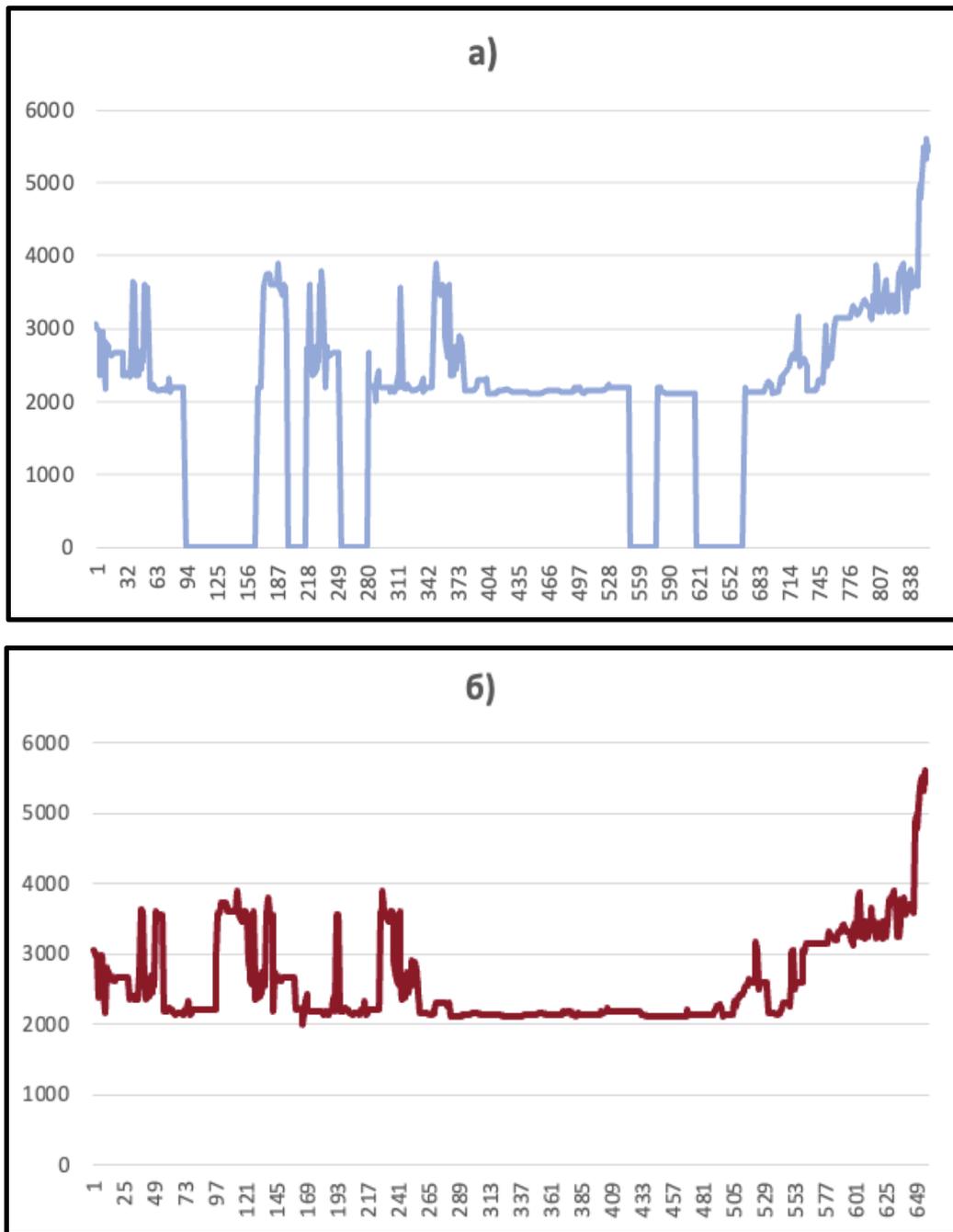


Рисунок 3.1 – Графики хода измерений НГО для летних дней
а) до фильтрации нулей, б) после фильтрации

Для июльских дней уже видим как облачность нижнего яруса (0-2000 м), так и облачность среднего яруса (2000-7000 м для умеренных широт) с разрывами. [11]

Примечательно, что в течение всего срока измерения явной тенденции понижения нижней границы облачности не наблюдалось. На протяжении большей части срока наблюдения нижняя граница находилась на высоте около 2 км, однако были и явные тенденции повышения ВНГО: так, например,

- ярко выражены облака среднего яруса в измерения с 1 по 55 (хотя, там и виднелась тенденция понижения высоты НГО),
- в промежуток 95 — 169 измерение (тут также не обошлось без видимой тенденции на понижение),
- с 200 по 220 измерение, с 253 по 281 измерение, плавные повышения
- в промежутки с 550 по 580 и с 620 по 670 измерение с последующим понижением облачности.

Далее хочется посмотреть как были распределены данные измерений, включая случаи ясного неба, а также после того, как мы исключили таковые с помощью программы, написанной кафедрой ЭФА. А также это позволит увеличить степень наглядности и достоверности, сравнив изначально полученные данные с итоговыми значениями.

Для этого сперва исключим значения ясного неба и построим гистограммы распределения (частот), — довольно эффективный способ визуально отразить, какие значения в анализируемом ряде встречаются чаще, а какие реже, также это позволяет определить как распределены значения выборки или ряда.

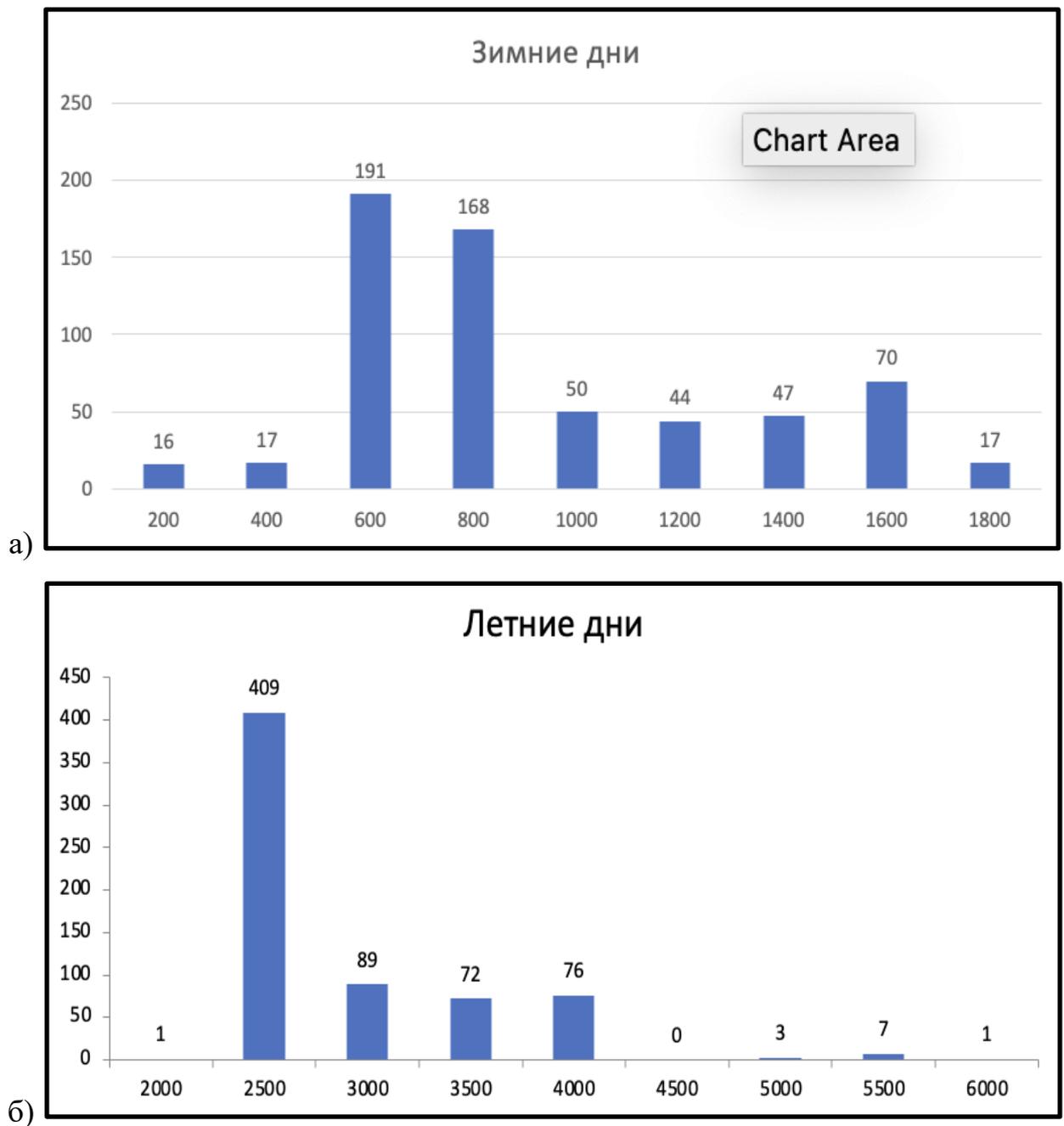


Рисунок 3.4 Гистограмма частот НГО

а) зимние дни; б) летние дни

Проанализировав полученные гистограммы, можем сделать вывод, что данные распределены неравномерно как в летний период, так и в зимний, какой-либо закономерности не наблюдается, однако при всем этом отчетливо видим тотальное преобладание облачности среднего яруса летом, а также преобладание облаков нижнего яруса зимой. Летом также, пусть и

незначительно, была измерена облачность верхнего яруса. Суммарно за оба периода измерений наблюдалась облачность всех трех видов.

Для расширения достоверности методики, описанной выше, сделаем все те же этапы, что и ранее, но уже для других дней. Начнем с инструмента Excel «Анализ данных».

Таблица 3.1

Характеристика ряда высоты нижней границы облачности в начале двух месяцев

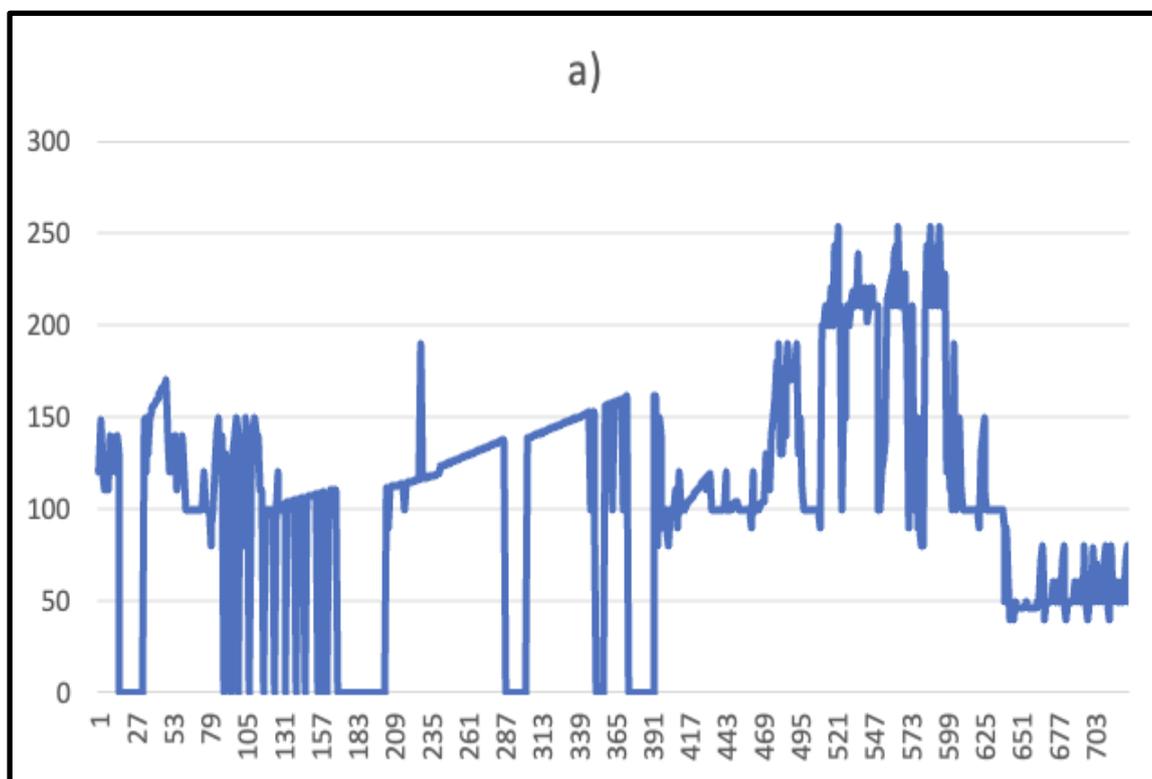
	Зима	Лето
среднее	127	1455
стандартная ошибка	14	27
мода	0	0
стандартное отклонение	71	430
интервал	390	2430
минимум	0	0
максимум	390	2430
счет	11519	11519

Снова таблица с данными расчётов подтверждает, что в оба сезона значение моды равно нулю, что соответствует безоблачному небу, это мы снова увидели.

Здесь же видно, что среднее значение в начале января и начале июля разнятся уже практически в 10 раз: по датчику среднее значение ВНГО выше в начале июля (1455 м), тогда как по датчику в начале января – 127 метров. То есть со средними значениями картина совсем не отличается от случая с серединами месяцев. И в очередной раз максимальное значение ВНГО сильно разнится. В этот раз в период начала января чаще наблюдалась облачность

только нижнего яруса, а в начале июля – нижнего и среднего. Видно, что, рассматривая эти периоды времени, общая высота НГО оказалась ниже, по сравнению с предыдущим примером. Повторюсь, подобная разница в средних значениях, вероятно, связана, как раз, с тем, что производится меньше замеров ясного неба зимой, — напомню, это вполне характерно для района Санкт-Петербурга и Ленинградской области.

Значение моды снова равно нулю во обоих случаях, а значит снова уверенно можем заявить, что ясное небо в исследуемом ряду встречается чаще любых других значений. Уже ранее упоминалось, что обстоятельство указывает на то, что для получения статистических характеристик, иллюстрирующих, в частности, изменчивость высоты нижней границы облаков около среднего его значения в исследуемом ряду, необходимо исключить все значения ВНГО, равные 0.[14] Повторяем действия.



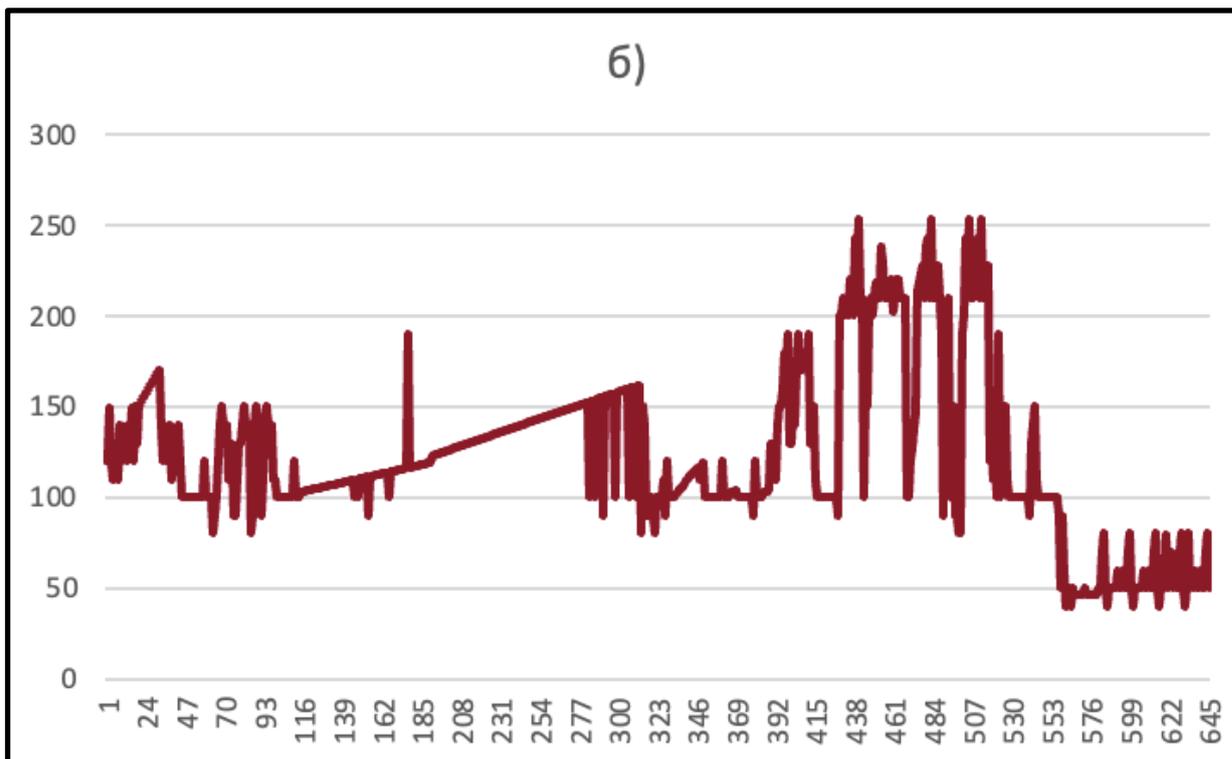


Рисунок 3.5 – Графики хода измерений НГО для начала января
 а) до фильтрации нулей, б) после фильтрации

Для начала января уже видим облачность только нижнего яруса (0-2000 м). [11]

На протяжении всего срока наблюдения нижняя граница находилась в пределах высоты от 40 до 260 м, довольно низкая облачность, однако были явные тенденции повышения/понижения ВНГО: так, например,

- ярко выражена плавная тенденция подъема с 95 по 270;
- в промежуток 310 — 392 наблюдалось резкое понижение;
- с 435 по 515 измерение, с 579 по 650 измерение, циклические колебания, а также значимое последующее понижение облачности.

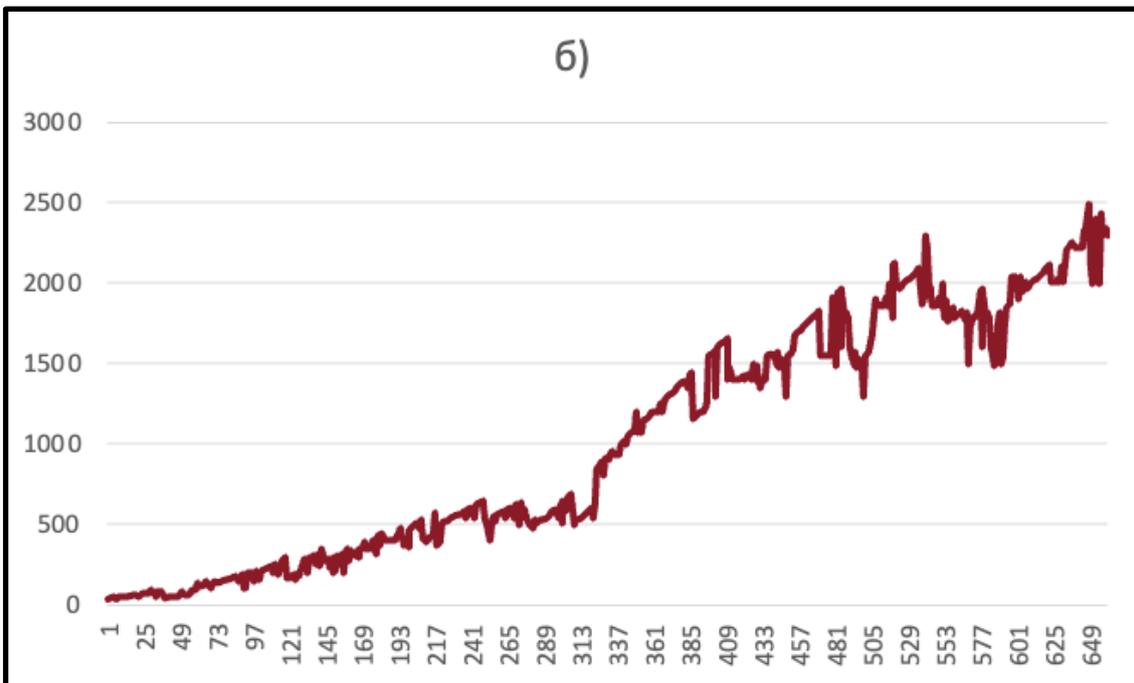
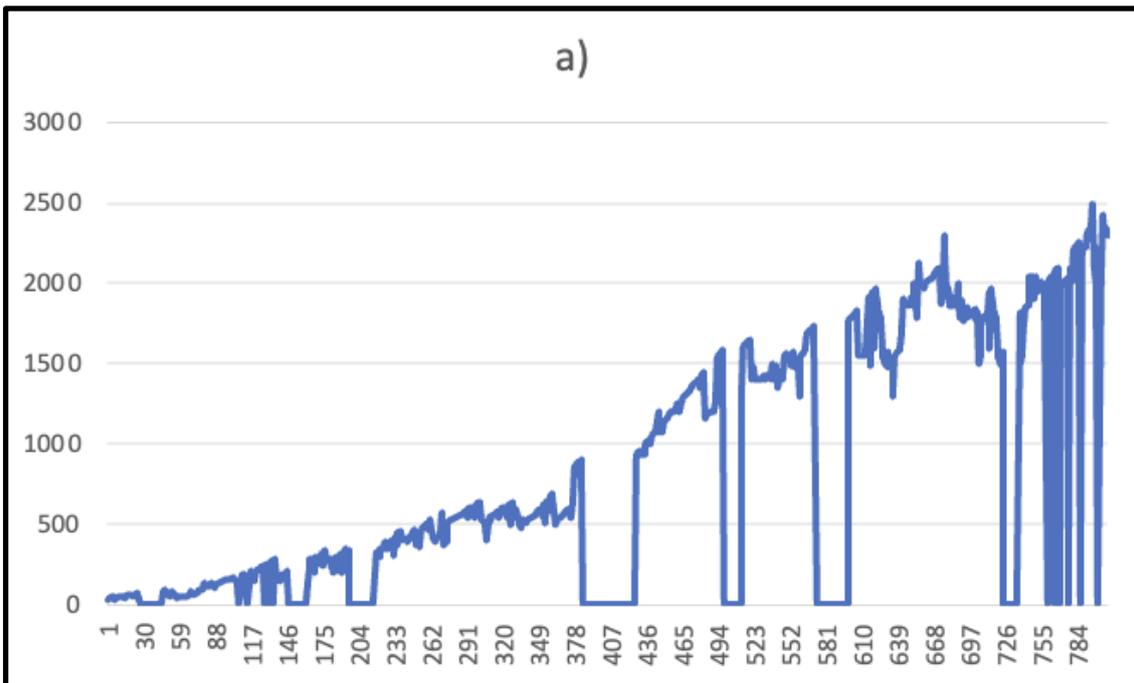


Рисунок 3.6 – Графики хода измерений НГО для начала июля
 а) до фильтрации нулей, б) после фильтрации

Для начала июля характерна очевидная тенденция повышения высоты НГО в течение всего периода наблюдения. Наблюдаем как облачность нижнего яруса (0-2000 м), так и среднего (2000-7000). [11]

На протяжении всего срока наблюдения нижняя граница находилась в пределах высоты от 30 до 2430 м, а также, несмотря на периодические опускания НГО, сохраняется общая тенденция подъема.

Аналогично с предыдущим примером хочется посмотреть, как были распределены данные измерений, включая случаи ясного неба, а также после того, как мы исключили таковые с помощью программы, написанной кафедрой ЭФА.

Строим гистограммы частот.

А)

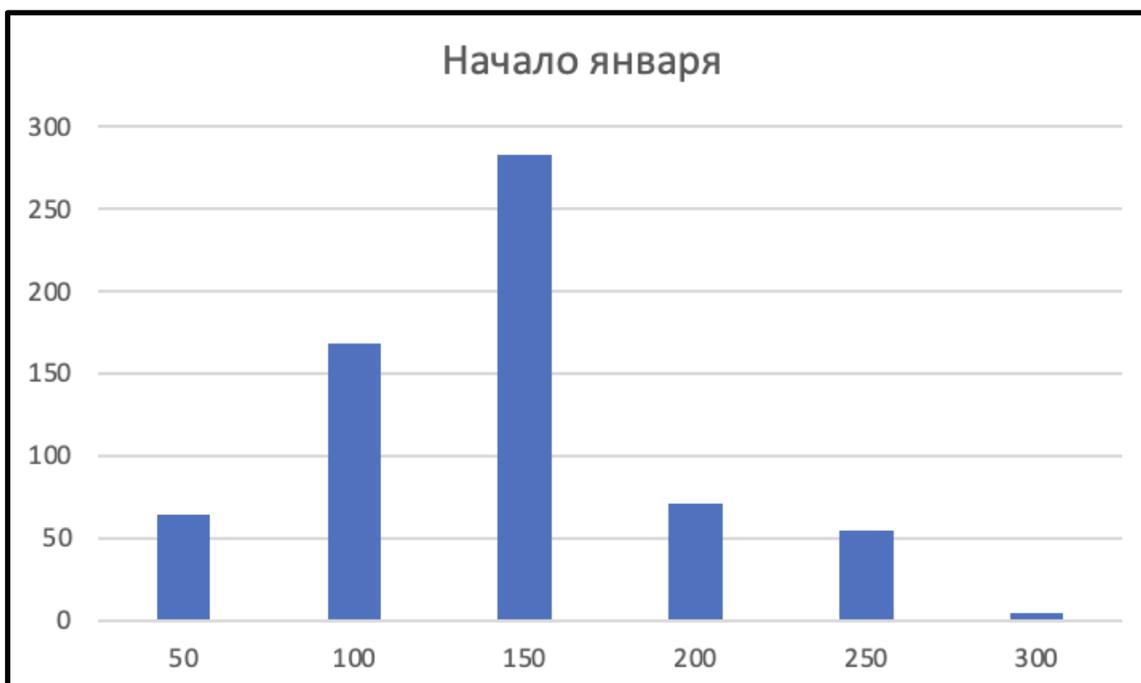




Рисунок 3.7 Гистограмма частот НГО

а) начало января; б) начало июля

Проанализировав полученные гистограммы, можем сделать вывод, что данные распределены неравномерно в летний период и довольно равномерно в зимний. Какой-либо закономерности не наблюдается в начале июля, а вот в начале января видна определенная закономерность, - видна тенденция повышения ВНГО, как уже отмечалось выше. При всем этом отчетливо видим тотальное преобладание облачности нижнего яруса в начале января, когда в начале июля, хоть и преобладают облака нижнего яруса, но это преобладание не абсолютно, - облаков среднего яруса на небе наблюдалось немало.

Заключение

В данной работе были рассмотрены особенности обработки и интерпретации данных по высоте НГО, полученных с экспериментального комплекса ООО «ИРАМ» с датчика, работа которого основана на использовании технологии LiDAR.

Степень выполнения поставленных задач:

- рассмотрены теоретические основы и физические принципы работы датчика LiDAR и особенности его использования;
- изучена методика уменьшения дискретности, показаны целесообразность и эффективность применения уменьшения дискретности.
- отражено, что расширение интервала между измерениями с 15 с до 5 мин., дает возможность не пропустить основные тенденции изменения высоты нижней границы облачности и, вместе с тем избавиться от незначительных флуктуаций; [13]
- изучена методика проверки значений НГО на выбросы;
- показано, что так называемом «выбросом» значений ВНГО является значение $ВНГО = 0$, то есть ясное небо, а потому в первую очередь необходимо фильтровать нулевые значения;
- на примере реальных данных выполнена обработка результатов измерений с помощью программ, разработанных на кафедре экспериментальной физики атмосферы, и подтверждена возможность сделать процесс автоматическим;
- проведена интерпретация данных измерений.

В качестве основных итогов выпускной квалификационной работы важно отметить, что проверяемая методика обработки и интерпретации данных по высоте нижней границы облачности дает возможность получить показательные данные об облачности в пункте наблюдений с

учетом уменьшения дискретности измерений и исключения из ряда данных в случаях ясного неба или безоблачной атмосферы.

Методика включает в себя:

1. Интеракцию с дискретностью, а, будучи более точным, ее сокращение;
2. Фильтрацию нулей – ведь для данных о ВНГО «выбросом», конечно, являются значения безоблачной атмосферы, или значения, равные «0»;
3. Превращение анализ ряда ВНГО на разрывы и выбросы в автоматический.

В работе показано, что методика работает на примере данных датчиков с экспериментального полигона ООО «ИРАМ», работа которых основана на применении технологии LiDAR с разными типами и количеством облачности.

Данную методику можно применять при обработке и анализе высоты нижней границы облаков.

Так же можно дать следующие рекомендации:

- процедура фильтрации нулей может быть использована только в тех случаях, когда нет необходимости фиксировать отсутствие облачности;
- фильтрация нулей, значений при отсутствии облачности, позволяет без ущерба для исследования уменьшить трудозатраты при анализе на наличие выбросов.

Список использованных источников

- 1) Борейшо А. С. Лидарные комплексы для исследования атмосферы: учебное пособие для вузов / А. С. Борейшо, М. А. Коняев, А. А. Ким. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 244 с.
- 2) Борейшо А. С. Современные лидарные средства дистанционного зондирования атмосферы [текст]/ А. С. Борейшо [и др.]// Лазеры и лазерные системы. 2019, – 648-657 с.;
- 3) Вайншенкер А. Е. Лазер на YAG : Nd³⁺ с диодной накачкой, работающий в режиме модуляции добротности в широком интервале температур без термостабилизации диодов накачки [текст]/ Вайншенкер А. Е. [и др.]// Квантовая электроника. 2013, – 114-116 с.;
- 4) Second-Harmonic Generation [электронный ресурс] -URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/second-harmonic-generation> (ресурс удаленного доступа);
- 5) Андреев Ю. М. Лидарные системы и их оптико-электронные элементы [текст]/ Ю. М. Андреев. – Томск: Издательство института оптики атмосферы, 2004. – 525 с.;
- 6) Kovalev V., Eichinger W. Elastic LiDAR: Theory, practice, automatic analysis methods/ Vladimir A. Kovalev, William E. Eichinger. – Hoboken (N. J.): Wiley-interscience, cop. 2004. – XVI, 615 с.;
- 7) VAISALA.COM [электронный ресурс] - URL: <https://www.vaisala.com/en>;
- 8) Матвеев Л.Т. Основы общей метеорологии. Физика атмосферы. – Спб.: ГМИ, 2000;
- 9) Международные стандарты и рекомендуемая практика. Приложение 3 к Конвенции о международной гражданской авиации. Метеорологическое обеспечение гражданской авиации, часть I. Основные SARPS, часть II. Добавления и дополнения. Изд. семнадцатое, июль 2010;

- 10) Руководство по системам метеорологических наблюдений и распространении метеорологической информации на аэродромах. – Женева: Изд. ВМО, 1992, - 63с;
- 11) Официальный сайт ВМО [электронный ресурс]: - <https://public.wmo.int/ru> (ресурс удаленного доступа);
- 12) Международный атлас облаков. ВМО [электронный ресурс]: - <https://cloudatlas.wmo.int/ru/home.html> (ресурс удаленного доступа).
- 13) Шакиров Р.З. Особенности первичного контроля высоты нижней границы облачности. Сборник статей Межвузовской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной празднованию 90-летия Российского государственного гидрометеорологического университета «Земля и Человек. Актуальные вопросы современного состояния окружающей среды». 2020. С. 126-130;
- 14) Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. – Спб.: РГГМУ, 2008. – 407 с.