

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра высшей математики и физики

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

Бакалаврская

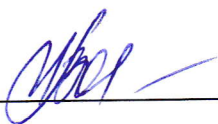
Исследование фонового излучения на фиксируемый сигнал.

Руководитель Рубаев Дмитрий Владиславович

Научный руководитель Потапова Ирина Александровна

«Содержит допуск»

подписанной кафедрой



(подпись)

Зайцева Ирина Владимировна

(фамилия, имя, отчество)

июль 2023 г.

Санкт-Петербург

Реферат

Дипломная работа: 53с., 13рис., 4табл., 1 приложение,
7 источников литературы.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ФИКСИРУЕМЫЙ СИГНАЛ

Объект исследования: Атмосфера

Предмет исследования: Фоновая засветка

Цель работы: Проанализировать экспериментальные данные, полученные с лидарной установки, найти более удобный метод расчета фоновой засветки и коэффициента ослабления и показать как он зависит от расстояния и фоновой засветки.

В дипломной работе проводится анализ атмосферы и аэрозольных частиц в ней и их влияние на зондирующий лазер со спутника, также проводится анализ экспериментальных данных.

Разработан более простой и быстрый метод расчета коэффициента ослабления.

Введение	5	
I. Актуальность	6	
II. Задачи и цели	8	
II.A.Цель работы:	8	
II.B.Задачи работы:	8	
III. Способы определения концентрации веществ в атмосфере	8	
IV. Параметры установки и эксперимента	9	
V. Состав атмосферы	10	
V.A.Тропосфера	10	
V.B.Стратосфера	11	
V.C.Мезосфера	11	
V.D.Термосфера	12	
V.E.Экзосфера	13	
VI. Содержание газов в атмосфере	14	
VI.A.Аэрозоли	14	
VI.B.Загрязнители	14	
VI.C.Влияние на здоровье человека	15	
VII.		Л
идар	16	
VII.A.Общие сведения	16	
VII.B.Устройство лидара	17	
VII.C.Устройство линзы в лидаре	18	
VIII.		И
зучение атмосферы при помощи лазера	20	
IX. Физические принципы, используемые в лазерном зондировании	20	
IX.A.Флюоресценция	21	
IX.B.Молекулярное поглощение	22	
IX.B.1.Водяной пар	24	
IX.B.2.Углекислый газ	25	

IX.В.3.Озон	26	
IX.В.4.Кислород	26	
IX.С.Молекулярное рассеяние света	27	
IX.Д.Рассеяние и поглощение аэрозолями	28	
X. Разновидности лазеров	29	
X.А.Газовые лазеры	29	
X.А.1.Не-Не лазер	30	
X.А.2.Углекислотный лазер	31	
X.В.Твердотельные лазеры	32	
X.В.1.Лазеры на стёклах, активированных неодимом	33	
X.В.2.Лазеры на рубиновых кристаллах	33	
X.В.3.Лазеры на кристаллах иттрий-алюминиевого граната (ИАГ)	34	
X.С.Жидкостные лазеры на красителях	34	
X.Д.Полупроводниковые лазеры	35	
XI. Коэффициент ослабления	37	
XII.		М
методы расчёта влияния фоновой засветки	37	
XII.А.Расчёт фоновой засветки	41	
XII.В.Определение коэффициента ослабления:	42	
XIII.		Х
од работы	45	
XIII.А.Исходные данные и их преобразование	45	
XIII.В.Наглядное представление данных	46	
XIII.С.Работа с данными	49	
XIV.		У
условия реализации метода дифференциального поглощения	55	
XV.		З
включение	56	
Источники	57	
Приложение	57	

ВВЕДЕНИЕ

Изучение экологии в наше время является крайне важным, поскольку человечество сталкивается с множеством экологических проблем. Одной из них является изменение климата, вызванное выбросом парниковых газов в атмосферу. Также существуют проблемы загрязнения воздуха, воды и почвы, вымирание многих видов животных и растений, ухудшение качества жизни людей в городах. Изучение экологии помогает понимать эти проблемы и разрабатывать методы их решения, а также принимать меры по сохранению природы и биоразнообразия нашей планеты для будущих поколений.

В современной атмосферной оптике, изучение влияния различных факторов на распространение электромагнитных волн в атмосфере является одним из важнейших направлений исследований. Одним из таких факторов является фоновое излучение. Фоновое излучение влияет на процессы распространения электромагнитных волн, а также на точность зондирования атмосферы. В данной работе будет проанализировано влияние фонового излучения на определение коэффициента ослабления при зондировании слабо замутнённой атмосферы. Для достижения целей работы будут использованы современные методы исследования, такие как спектроскопия и математическое моделирование.

Исследования показывают, что парниковый эффект, вызванный высоким уровнем выбросов углекислого газа в атмосферу, является одной из самых серьезных экологических проблем нашего времени. Автомобили являются главными источниками выбросов углекислого газа, что в значительной степени влияет на изменение климата и вызывает негативные последствия для здоровья человека и окружающей среды. Например, высокий уровень загрязнения воздуха может привести к проблемам с дыхательной системой и сердцем, а также к повышенной смертности.

Вопросы экологии включают в себя множество аспектов, однако, в данной дипломной работе мы сосредоточимся на методе зондирования среды при помощи лидара и на способах обработки результатов. Задачей работы будет определение зависимости коэффициента ослабления от фонового излучения при зондировании слабо замутнённой атмосферы. Результаты этой работы могут быть полезны для улучшения существующих методов зондирования и повышения точности измерения параметров атмосферы, что в свою очередь может помочь в решении экологических проблем.

I. АКТУАЛЬНОСТЬ

Лидарная технология приобретает все большее значение в области робототехники и автономных транспортных средств. Лидарные датчики используют лазеры для сканирования и картографирования окружающей среды, создавая детализированное 3D-изображение, которое можно использовать для навигации и обнаружения объектов. Точность лидарных датчиков делает их важным компонентом при разработке самоуправляемых автомобилей, беспилотных летательных аппаратов и роботов-доставщиков. Лидарная технология также используется в сельском хозяйстве для создания подробных карт посевов и почвы, позволяя фермерам контролировать и оптимизировать свои операции. Нельзя не упомянуть активное развитие аэрокосмической сферы: дистанционного зондирования атмосферы космическими аппаратами и работы в области беспилотных летательных аппаратов.

Как указано выше лидары обширно используются в решении проблем экологии, приобретающих небывалую важность на момент написания данной работы. Прогресс в развитии лазерной техники, электроники и вычислительной техники обеспечил соответствующий прогресс в развитии и широком использовании оптического диапазона волн для всестороннего исследования атмосферы и протекающих в ней процессов.

Одновременное получение количественной информации о распределении индустриальных аэрозолей и загрязняющих атмосферу газов, с одной стороны, и влажности, температуры, скорости и направления ветра, с другой, обеспечивает решение задачи экологического мониторинга воздушного бассейна в ее наиболее полной постановке. Имеется в виду решение следующих основных задач экологического мониторинга: 1) получение надежной информации о состоянии загрязнения воздушных бассейнов и динамики ее изменения; 2) получение количественной информации о выбросах вредных веществ в атмосферу из труб всех организованных источников; 3) прогноз наступления наиболее опасных экологических ситуаций в атмосфере.

Перечисленные задачи следует рассматривать как концепцию экологического мониторинга ограниченного воздушного бассейна, например индустриального центра. Эта концепция не охватывает проблему экологического мониторинга атмосферы в глобальном и даже мезомасштабном объеме, в частности решение такой задачи, как трансграничные переносы загрязнений в атмосфере. В последнем случае необходимо использовать аэрокосмические средства зондирования.

Учитывая вышеописанные факторы, данная работа является актуальной, так как лидарные установки широко используются в различных областях, таких как аэрокосмическая промышленность, геодезия, метеорология, геология, экология и другие.

Одним из основных факторов, влияющих на качество работы лидарной установки, является фоновое излучение. Это может быть излучение солнца, земли или других источников, которое может затруднить обработку сигнала и снизить точность измерений.

Исследование влияния фонового излучения на фиксируемый сигнал лидарной установки позволит определить оптимальные условия работы и

настроек установки для минимизации влияния фонового излучения на измерения и повышения точности данных.

Таким образом, данная дипломная работа имеет практическое значение и может быть полезна для разработки новых методов и усовершенствования существующих технологий лидарных установок.

II. ЗАДАЧИ И ЦЕЛИ

II.A. ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

Цель данной работы разработка более простого и точного, по сравнению с другими методами, метода по обработке большого количества экспериментальных данных.

II.B. ЗАДАЧИ РАБОТЫ:

- анализ массива данных нескольких ЭХО-сигналов,
- определить зависимость коэффициента ослабления от фоновой засветки и от расстояния до рассеивающего объекта.

III. СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРЕ

Для измерения концентрации аэрозолей используются различные методы, например, методы фильтрации, импактные методы, методы оптической дифракции, методы масс-спектрометрии и другие. Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки, и выбор метода зависит от конкретных задач и условий проведения исследования. Некоторые методы, такие как методы фильтрации, позволяют получать информацию о размерах частиц и их концентрации, в то время как другие методы, такие как методы масс-спектрометрии, позволяют определять химический состав аэрозолей.

Методы лидарного зондирования используют лазерную технологию для измерения параметров атмосферы, таких как скорость ветра, температура, концентрация аэрозолей и другие. Эти методы основаны на измерении времени, за которое происходит отражение лазерного луча от объекта и его

возвращение обратно к детектору. Лидарные методы можно также использовать для зондирования природных вод для определения их биологической продуктивности или прогнозирования землетрясений.

Одним из главных преимуществ метода лидарного зондирования при измерении концентрации аэрозолей является его высокая точность и возможность получать информацию о концентрации аэрозолей на различных высотах в атмосфере.

В отличие от радио диапазона, в световом диапазоне частот из-за малости длин волн особенно видимого и УФ-излучения отражателями локационного сигнала являются все молекулярные и аэрозольные составляющие атмосферы, то есть по сути дела сама атмосфера формирует лидарный эхо-сигнал со всей трассы зондирования. Это позволяет осуществлять лазерное зондирование по любым направлениям в атмосфере.

Кроме того, лидарный метод позволяет исследовать не только концентрацию, но и микрофизические характеристики аэрозолей, такие как размер частиц. Также следует отметить, что лидарный метод является дистанционным, что позволяет измерять параметры атмосферы без прямого контакта с ней. [5]

IV. ПАРАМЕТРЫ УСТАНОВКИ И ЭКСПЕРИМЕНТА

Описание детектора: Si APD.

Описание фильтра: 3нм Band-pass (Barr).

Количество лазерных импульсов: 50.

Температура воздуха: 30°C.

Атмосферное давление: 725 мм.рт.ст.

Коэффициент ослабления: 0,0001

Энергия лазера: 50 Вт

Длина волны лазера: 1064 нм

Циклов проведено: 469762048.

V. СОСТАВ АТМОСФЕРЫ

Атмосфера – это слой газов, окружающий Землю и удерживаемый ею благодаря гравитации. Она состоит из нескольких слоев, каждый из которых отличается особыми свойствами.

Наиболее высокий слой атмосферы называется термосферой. Здесь температура достигает 2000 градусов по Цельсию, но воздух здесь очень разреженный.

Слой ниже термосферы называется мезосферой. Здесь температура начинает снижаться до -90 градусов, а воздух еще более разреженный.

Между этими слоями располагается мезопауза.

Средний слой атмосферы называется стратосферой. Здесь находится озоновый слой, защищающий Землю от ультрафиолетовых лучей.

Самый нижний слой атмосферы – тропосфера. Атмосфера здесь наиболее плотная и содержит основную массу парниковых газов.

Атмосфера играет важную роль в жизни на Земле, защищая нас от космического излучения, регулируя температуру и обеспечивая условия для жизни.

V.A. ТРОПОСФЕРА

Тропосфера – это нижний слой атмосферы Земли, который располагается от поверхности земли до высоты около 10-15 км в экваториальных регионах и до 7-8 км в полярных регионах. Этот слой содержит около 80% массы атмосферы и находится под влиянием земной поверхности, которая нагревается солнечным излучением.

В тропосфере происходят метеорологические явления, такие как образование облаков, осадки, ветры и турбулентность. Также в этом слое происходят процессы химических реакций, которые могут повлиять на состав атмосферы и климат Земли.

Тропосфера играет важную роль в жизни на Земле, поскольку она содержит кислород, необходимый для дыхания живых организмов, и защищает нас от вредного ультрафиолетового излучения солнца. Тем не менее, в этом слое также накапливаются загрязняющие вещества, такие как парниковые газы и аэрозоли, которые могут привести к изменению климата и ухудшению качества воздуха.

V.B. СТРАТОСФЕРА

Стратосфера – слой атмосферы Земли, непосредственно следующий за тропосферой, называется стратосферой. Он начинается на высоте около 10-15 км и заканчивается на высоте около 50 км. В стратосфере происходит резкое увеличение температуры, которое вызвано поглощением ультрафиолетового излучения смесью газов, в том числе озоном. Это поглощение защищает живые организмы на Земле от вредного ультрафиолетового излучения. Кроме того, именно в стратосфере находится озоновый слой, который является одним из ключевых компонентов нашей планеты и который защищает нас от опасных радиационных лучей.

V.C. МЕЗОСФЕРА

Мезосфера – это слой атмосферы Земли, расположенный между стратосферой и термосферой. Она начинается на высоте около 50 км и расширяется до высоты около 85 км. В этом слое атмосферы температура уменьшается по мере увеличения высоты. Мезосфера имеет важное значение для нашей планеты, так как она является первой линией защиты от космических объектов, таких как метеориты. Она также является местом, где возникают некоторые из самых ярких метеорных шоу, таких как Персеиды и

Лириды. В мезосфере также образуется слой ночного свечения, который происходит из-за взаимодействия солнечных частиц с атомами кислорода.

V.D. ТЕРМОСФЕРА

Термосфера - это верхний слой атмосферы Земли, расположенный на высоте от 80 км до 640 км. Этот слой является самым горячим из всех слоев атмосферы, потому что в нем практически нет молекул, которые могут поглощать и отдавать тепло. В термосфере температура может достигать более 2000 градусов по Цельсию, хотя эта температура и не ощущается из-за разреженности газа. Здесь находятся многие искусственные спутники Земли и Международная космическая станция.

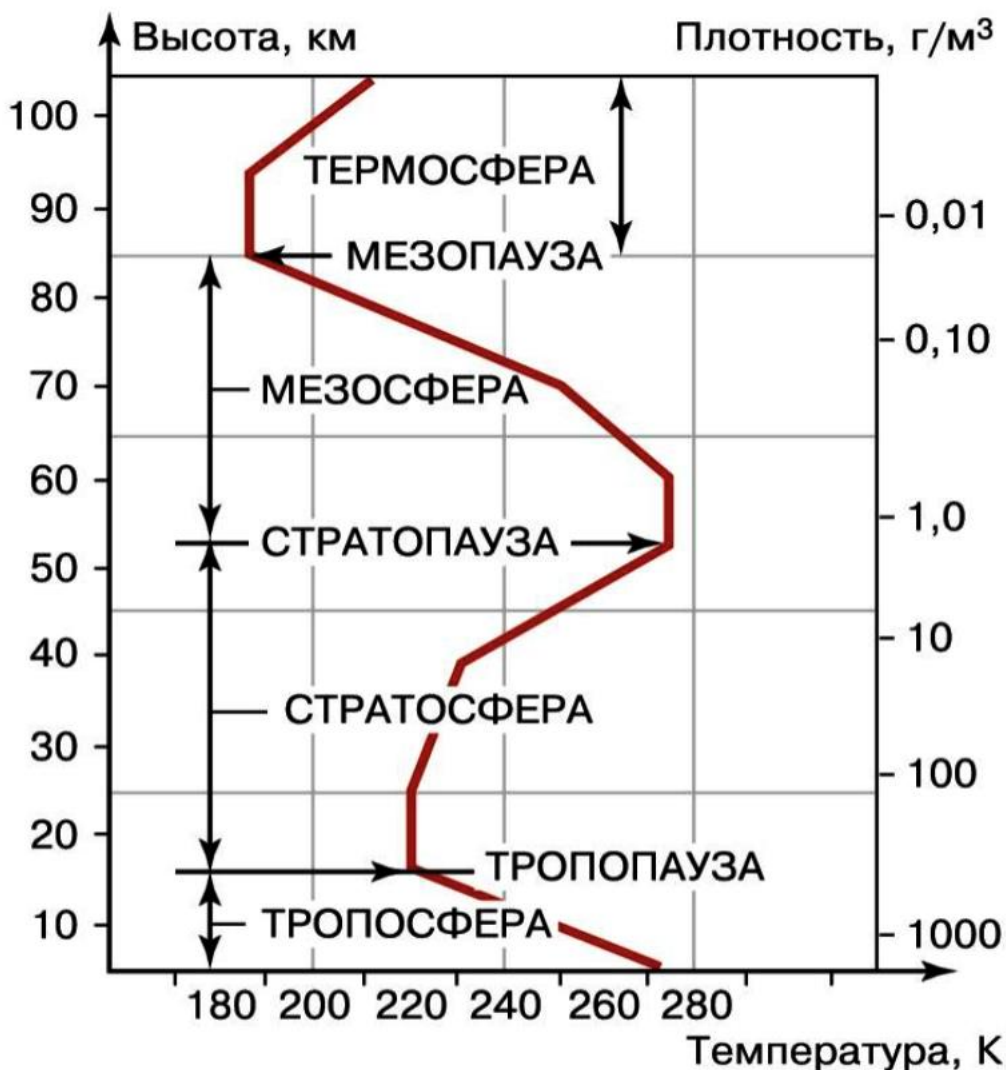


Рисунок 1 Строение атмосферы и распределение температуры в ней.

V.E. ЭКЗОСФЕРА

Выше находится экзосфера – слой атмосферы, нижняя граница которого 800км, а верхняя – 3000км. Это внешний слой атмосферы Земли. «Экзо» с греческого переводится как «снаружи». До определённого времени верхней границей считалась именно высоте примерно 3000км. Однако спутниковые наблюдения показали, что признаки экзосферы прослеживаются и на 20 000км. Всё, что выше 3000км носит название магнитосфера. Но на самом деле это почти та же экзосфера. Представляет собой газовый слой, который содержит молекулы гелия, водорода и азота, а также молекулы кислорода, которые выпадают из термосферы. В этом слое нет определенной границы, и он плавно переходит в космическое пространство. [6], [7]

VI. СОДЕРЖАНИЕ ГАЗОВ В АТМОСФЕРЕ

Приземный слой атмосферы, также называемый тропосферой, содержит около 78% азота, 21% кислорода и 1% других газов, включая аргон, углекислый газ и несколько важных газовых соединений, таких как метан и озон. Также в приземном слое атмосферы может содержаться вода в виде пара, аэрозоли и другие загрязнители в зависимости от конкретного места и условий среды.

Каждый газ в приземном слое атмосферы имеет свою уникальную роль и значение. Например, кислород необходим для дыхания живых организмов, азот является основным компонентом белков и ДНК, а углекислый газ играет ключевую роль в процессе фотосинтеза. Метан, хотя и представлен в атмосфере в малых количествах, также является парниковым газом, способствующим глобальному потеплению. Озон в верхних слоях атмосферы защищает от ультрафиолетовых лучей, но в приземном слое может быть вредным для здоровья человека.

VI.A. АЭРОЗОЛИ

Аэрозоль - это дисперсная система, состоящая из твердых или жидких частиц (дисперсной фазы), которые находятся в газовой среде (дисперсионной среде), обычно в воздухе. Аэрозоли могут быть естественными или искусственными. Они образуются при механических процессах, таких как дробление, распыление, сжигание и взрывы. Аэрозоли имеют уникальные свойства благодаря низкой вязкости газовой среды и высокой свободной длине пробега молекул газа относительно размера частиц. Концентрация массы аэрозолей - это важный физический параметр.

VI.B. ЗАГРЯЗНИТЕЛИ

Загрязнители в атмосфере появляются из различных источников, включая промышленные и бытовые выбросы, автотранспорт, сжигание топлива, лесные пожары, вулканические извержения и др. Кроме того, некоторые загрязнители могут образовываться в атмосфере под воздействием ультрафиолетовых лучей, например, озон.

VI.C. ВЛИЯНИЕ НА ЗДОРОВЬЕ ЧЕЛОВЕКА

В зависимости от типа загрязнителя, они могут оказывать различное воздействие на окружающую среду и здоровье человека. Например, загрязнение воздуха может привести к заболеваниям дыхательных путей, а загрязнение воды может оказывать токсическое воздействие на водные организмы и человека. Кроме того, некоторые загрязнители могут способствовать глобальному изменению климата и разрушению озонового слоя.

Аэрозоли очень сложны и включают в себя не только широкий спектр газов и твердых частиц, образующихся в результате природной и антропогенной деятельности, но и многие виды микроорганизмов, представляющих серьезную угрозу для здоровья человека. Существуют три различных аспекта воздействия в зависимости от размера аэрозоля. Стабильные частицы атмосферного аэрозоля диаметром 0,1-10 микрон оказывают наибольшее воздействие на здоровье человека, поскольку они долгое время витают в воздухе и поглощаются организмом непосредственно в дыхательных путях. Частицы диаметром 0,1-2,5 микрон оседают непосредственно в легких и альвеолах. Они также могут попадать в кровь по всему организму, и их токсичность наносит значительный ущерб здоровью человека. Центральные заболевания легких наиболее непосредственно связаны с содержанием твердых частиц в загрязненном воздухе.

Вторым аспектом воздействия атмосферных аэрозолей на здоровье является воздействие компонентов тяжелых металлов, входящих в состав аэрозольных твердых частиц, которые могут нанести вред здоровью человека и связаны со многими заболеваниями и повреждениями многих частей тела.

Третий аспект воздействия атмосферных аэрозолей на здоровье заключается в том, что химический состав аэрозолей содержит множество канцерогенов, включая полициклические ароматические углеводороды и нитрозамины. В качестве примера вредного воздействия аэрозолей

нитрозаминов можно привести обнаружение соединений нитрозаминов в крови беременных матерей и более высокую частоту выкидышей у матерей, хронически подвергавшихся воздействию сигаретного дыма.

Поэтому очень важно контролировать выбросы загрязняющих веществ в окружающую среду и принимать меры по их уменьшению. [3], [4]

VII. ЛИДАР

VII.A. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Лидар (от англ. Light Detection and Ranging — детектирование и измерение расстояний с помощью света) — это метод зондирования атмосферы, основанный на использовании лазерного излучения. Лидар работает следующим образом: лазерное излучение направляется в атмосферу, откуда отражается обратно на приемник. Измеряя время, за которое световой импульс вернулся на лидар, можно определить расстояние до объекта, от которого произошло отражение. Одновременно с этим, анализируя свойства отраженного излучения, можно получить информацию о составе и свойствах атмосферы (например, о концентрации загрязняющих веществ, о температуре, влажности и т.д.). Лидары используются в метеорологии, экологии, аэрокосмических исследованиях и других областях. Разновидностью атмосферных лидаров являются *доплеровские лидары*, определяющие направление и скорость перемещения воздушных потоков в различных слоях атмосферы. [1]

Основные преимущества лазера: когерентность, высокая плотность и мгновенная мощность излучения. Излучателями света в таких системах могут служить и обычные светодиоды. Однако в основных сферах применения технологии таких как метеорология и геодезия с дальностью действия от сотен метров до сотен километров используются только лазеры.

В отличие от радиоволн, эффективно отражающихся только от достаточно крупных металлических целей, световые волны подвержены рассеянию в любых средах, в том числе в воздухе, поэтому возможно не

только определять расстояние до непрозрачных (отражающих свет) дискретных целей, но и фиксировать интенсивность рассеивания света в прозрачных средах. Возвращающийся отражённый сигнал проходит через ту же рассеивающую среду, что и луч от источника, подвергается вторичному рассеиванию, поэтому восстановление действительных параметров распределённой оптической среды — достаточно сложная задача, решаемая как аналитическими, так и эвристическими методами.

VII.B. УСТРОЙСТВО ЛИДАРА

Распространяясь по атмосферной трассе зондирования, лазерный импульс испытывает поглощение и рассеяние на молекулах и аэрозолях атмосферы. Часть излучения, рассеянная атмосферой назад в направлении

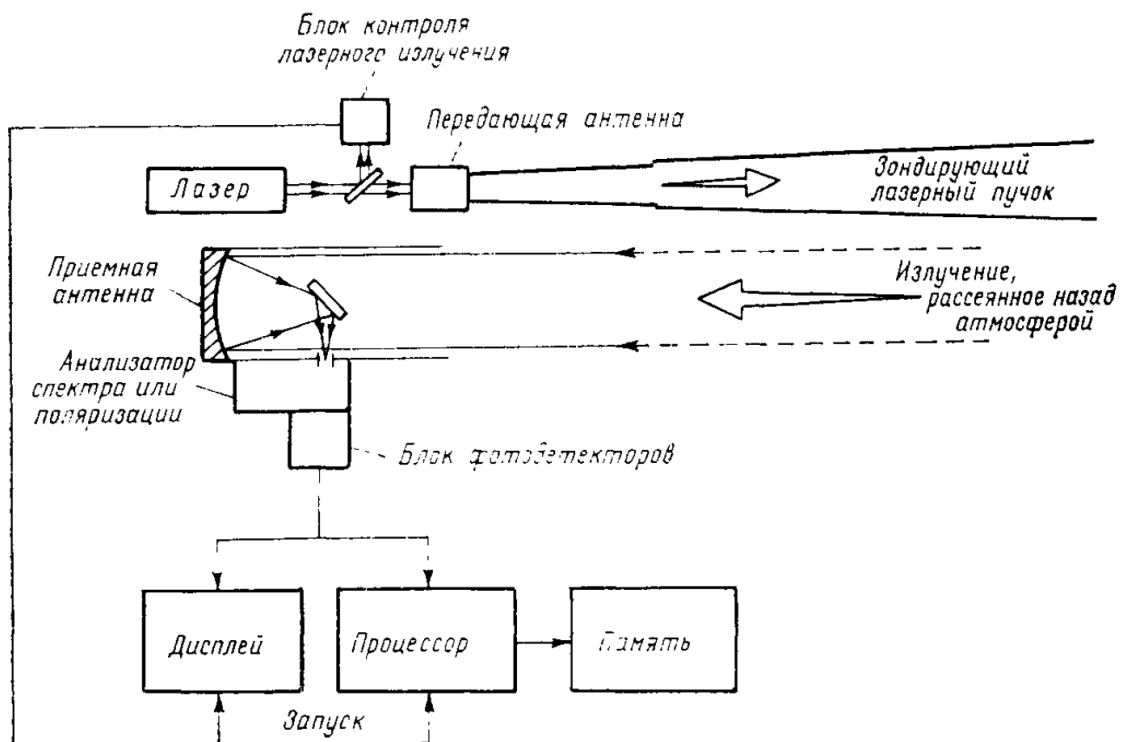


Рисунок 2 Обобщённая схема лидара.

лидарной системы, может быть собрана и сфокусирована с помощью приемной антенны на фотодетектор, который преобразует ее в электрический сигнал, пропорциональный падающему световому потоку. При этом расстояние до любого рассеивающего объема на трассе зондирования

однозначно определяется по значению временного интервала с момента посылки лазерного импульса, поскольку свет распространяется с известной скоростью. А интенсивность принятого сигнала в каждый конкретный момент времени зависит как от свойств конкретного рассеивающего объема атмосферы, так и от характеристик всей атмосферной трассы зондирования на двойном пути от лидара до рассеивающего объема и обратно.

При многочастотном зондировании могут использоваться различные комбинации лазеров, как перестраиваемых по частоте, так и с фиксированными частотами излучения, с разными типами преобразователей частоты, среди которых наиболее широкое распространение получили генераторы гармоник (ГГ) и газовые ВКР-ячейки высокого давления.

Для дополнительного уменьшения расходимости лазерного излучения обычно используют оптические расширители пучка на основе линзовых или зеркальных телескопов, в том числе внеосевых. Лазерный источник совместно с передающей антенной составляют лазерный передатчик лидара (или лидарный передатчик).

VII.C. УСТРОЙСТВО ЛИНЗЫ В ЛИДАРЕ

Приемная антенна лидара представляет собой телескоп, чаще всего зеркальный, построенный обычно по схеме Ньютона или Кассегрена, в фокусе которого устанавливают полевую диафрагму. Она служит для сужения угла

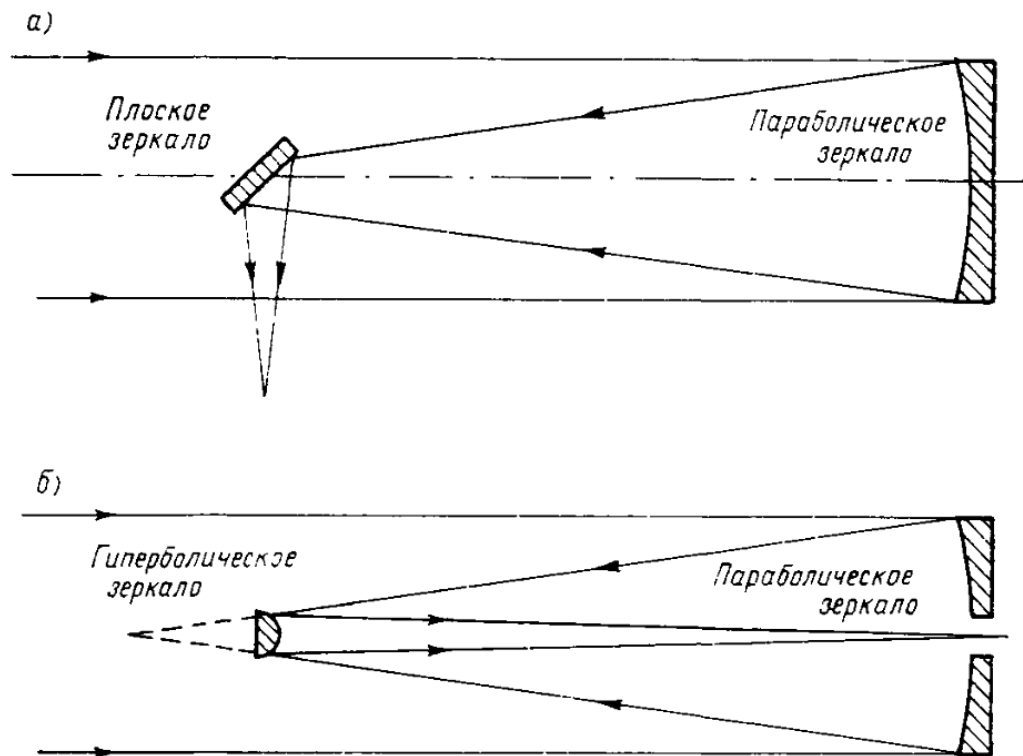


Рисунок 3 Зеркальные телескопы Ньютона (а) и Кассегрена (б).

зрения приемной антенны ϕ , поскольку он определяется отношением $\phi = d_0/f$, где d_0 — диаметр полевой диафрагмы, f — фокусное расстояние телескопа. Уменьшение угла зрения приемной антенны позволяет снизить уровень фоновых шумов, приходящих из атмосферы. Однако при этом необходимо учитывать, что уменьшение ϕ всегда ограничено снизу углом расходимости зондирующего лазерного излучения ψ , то есть $\phi \gg \psi$, откуда $d_{0min} = \psi\phi$. [2]

VIII. ИЗУЧЕНИЕ АТМОСФЕРЫ ПРИ ПОМОЩИ ЛАЗЕРА

С тех пор как озон был впервые обнаружен учеными в 1930-х годах, был достигнут значительный прогресс в выявлении и измерении влияния природных и антропогенных факторов на атмосферу. Технологические достижения, такие как радар и лазеры, позволили ученым лучше понять атмосферу Земли и ее изменения. Возможность сбора данных с помощью наземного, воздушного, а теперь и космического оборудования дистанционного зондирования позволила нам получить новое глобальное представление об атмосфере.

Одновременное получение количественной информации о распределении индустриальных аэрозолей и загрязняющих атмосферу газов, с одной стороны, и влажности, температуры, скорости и направления ветра, с другой, обеспечивает решение задачи экологического мониторинга воздушного бассейна в ее наиболее полной постановке. Более подробно об этом было рассказано выше в разделе I.

IX. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ЛАЗЕРНОМ ЗОНДИРОВАНИИ

Лазеры взаимодействуют с атмосферными компонентами на основе фундаментальных физических явлений:

- 1) рассеянием и поглощением аэрозолями
- 2) флюоресценцией атмосферных газов и аэрозолей
- 3) нелинейными эффектами
- 4) поглощением газами
- 5) молекулярным рассеянием
- 6) резонансным рассеянием

7) комбинационным рассеянием.

Каждое из этих явлений может рассматриваться отдельно, и каждое может быть минимизировано или увеличено по сравнению с другими для получения необходимой в данный момент информации о воспринимаемом объекте.

IX.A. ФЛЮОРЕСЦЕНЦИЯ

Флюоресценция возникает при фотонном взаимодействии, а именно при поглощении некоторого фотона с частотой ν_{ij} с последующим резким испусканием фотона с частотой ν_{jk} . Из данного определения можно описать спектральное сечение выражением:

$$1. \quad \sigma_f(\lambda_{jk}, \lambda_{ij}) = \sigma_a(\lambda_{ij})\eta_f(\lambda_{jk}, \lambda_{ij}),$$

где σ_a – сечение поглощения;

$\eta_f(\lambda_{jk}, \lambda_{ij})$ – квантовая эффективность, зависящая от коэффициента тушения Q_f и спектральной формы линии флюоресценции $L_f(\lambda_{ik})$:

$$1.1. \quad \eta_f(\lambda_{jk}, \lambda_{ij}) = Q_f L_f(\lambda_{ik})$$

Здесь Q_f отвечает за соотношение излучательных и столкновительных переходов и задаётся формулой Штерна-Фольмера

$$1.2. \quad Q_f = \frac{\gamma_R}{\gamma_R - \gamma_Q} = \frac{1}{1 + \sum_m q_m P_m}$$

где q_m – коэффициент тушения излучающей молекулы при столкновении с атмосферным компонентом, индекс m связан с парциальным давлением P_m ,

γ_Q – полуширина тушения флюоресценции,

γ_R – полуширина радиационного распада j -го возбуждённого состояния,

$L_f(\lambda_{ik})$ описывает эффективность радиационного перехода полной полосы флюоресценции, то есть:

$$1.3. L_f(\lambda_{ik}) = \frac{A_{jk}}{\gamma_R} = \frac{A_{jk}}{\sum_{i<j} A_{ij}}$$

A_{jk} и A_{ij} – вероятность радиационных переходов.

В атомах и простых молекулах спектр флюоресценции дискретный, частота избытка испущенных фотонов равна или меньше частоты поглощенных фотонов. Такая флюоресценция традиционно называется резонансной. В мезосфере и верхней термосфере флюоресценция приобретает характер резонансного рассеяния.

В молекулах со сложной энергетической структурой возбуждение фотонного лазерного излучения, поглощенного при столкновениях с атмосферными атомами и молекулами, перераспределяется на различные уровни за счет нелюминесцентного перехода. Этот процесс приводит в основном к широкополосной флюоресценции с почти непрерывным спектром.

Однако аэрозольная эмиссия снижает полезную информацию о резонансном сигнале флюоресценции в нижнем слое атмосфере.

IX.B. МОЛЕКУЛЯРНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ

Спектр поглощения молекулы обычно состоит из нескольких "линий". Эти линии соответствуют дискретным различиям в энергетических моделях

внутри молекулы. Другими словами, линия - это часть спектра, которая

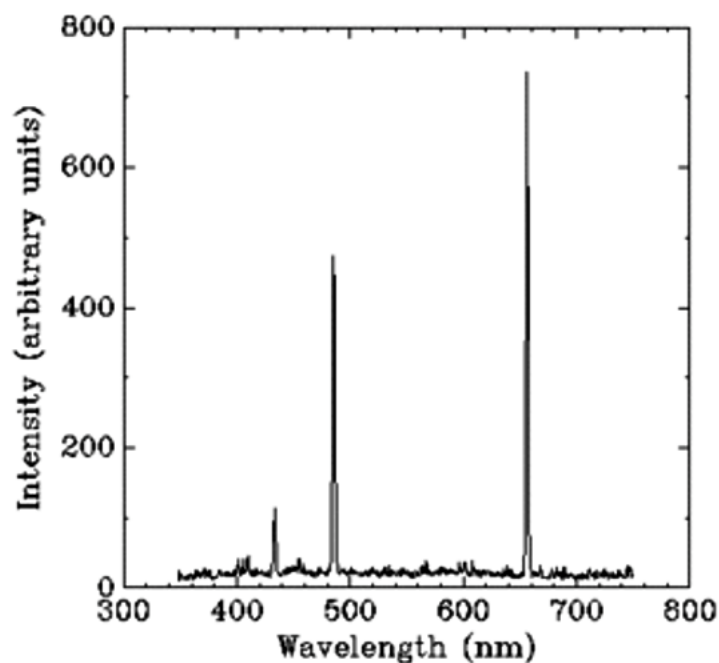


Рисунок 9 Спектры излучения водородной плазмы.

соответствует переходу из одного квантового состояния в другое. Группа линий, в свою очередь, может образовывать колебательную полосу. Положение, интенсивность и форма спектральных линий могут дать точные физические характеристики молекулы, претерпевшей внутренний энергетический переход. Положение спектральных линий указывает на различные молекулярные параметры, такие как межъядерные расстояния и углы молекулярных связей. С другой стороны, интенсивность и форма спектральных линий могут указывать на состав, температуру, давление и скорость молекул в излучающем газе. Эта концепция проиллюстрирована на рисунке 9, где показан спектр излучения водородной плазмы.

Положение центра в частотном спектре определяется энергетическим расстоянием между двумя уровнями оптического перехода $i - j$ в квантовой энергетической структуре молекулы газа.

$$1.4. hcv_{ij} = E_i - E_j,$$

где h – постоянная Планка,

c – скорость света,

ν_{ij} – частота перехода,

E_i и E_j – энергии нижнего и верхнего уровней.

IX.В.1. ВОДЯНОЙ ПАР

Коэффициенты поглощения водяного пара могут быть ответственны за повышение тропосферной температуры ниже 10 км над уровнем моря. Глобальное потепление играет важную роль в воздействии на жизнь человека и поэтому нуждается в существенном определении и детальном исследовании. Солнечное излучение в коротковолновом диапазоне может поглощаться и рассеиваться атмосферой, а также поглощаться и отражаться на поверхности. Излучение на более высоких длинах волн от поверхности Земли может поглощаться атмосферными газами, такими как водяной пар и углекислый газ. Из-за разницы между солнечным излучением и энергией, высвобождаемой в космос из атмосферы, атмосфера действует как стеклянный дом, повышая температуру атмосферы. Колебательный спектр водяного пара охватывает всю видимую, ближнюю и среднюю инфракрасную область вплоть до 1000 см^{-1} , с полосами поглощения, расположенными при 0,95; 0,72; 0,81; 0,94; 1,1; 1,38; 1,87; 2,47; 2,66; 3,7; 6,25 мкм. Самая сильная полоса поглощения находится при 6,25 мкм. Эта полоса полностью поглощает солнечное излучение в диапазоне длин волн 5,5-7,5 мкм в вертикальном столбе атмосферы средней влажности; полосы поглощения с центром на 3,17, 2,66 и 2,47 мкм определяют полное поглощение солнечного излучения в

спектральном диапазоне 2,66-3,3 мкм в вертикальном столбе атмосферы средней влажности. Вращательный спектр поглощения водяного пара охватывает довольно широкий спектральный диапазон от около 8 мкм до нескольких сантиметров. От длин волн около 20 мкм до длинноволновой области вращательный спектр поглощения водяного пара может описать полное поглощение солнечного излучения вертикальным столбом атмосферы при всех уровнях влажности. Решая одномерное нестационарное уравнение теплопередачи-излучения с помощью компьютерной программы COMSOL, можно интерпретировать прогнозируемую температуру и плотность водяного пара при различных длинах оптического пути, детали коэффициента поглощения и взаимосвязь между интенсивностью полосы и эффективной шириной полосы с помощью экспоненциальной широкополосной модели. Результаты показывают, что коэффициент поглощения сильно зависит от концентрации водяного пара. Например, при увеличении молярной доли водяного пара с 0,005 до 0,02 коэффициент поглощения в полосе с центром на 71 мкм увеличивается с 0,3 до 1,2 m^{-1} в тропосфере и с 0,6 до 3,1 m^{-1} у поверхности. Предсказанные коэффициенты поглощения находятся в согласии с экспериментальными и теоретическими результатами, представленными в литературе. Представлен более подробный и реалистичный температурный профиль в тропосфере с длиной оптического пути 104 м.

IX.B.2. УГЛЕКИСЛЫЙ ГАЗ

Основная осциллирующая вращательная полоса с центром около 15 мкм вместе с 14 другими полосами занимает довольно широкую спектральную область около 12-20 мкм. В центральной части этой полосы (13,5-16,5 мкм) вертикальный атмосферный столб полностью поглощает солнечное излучение любой длины волны в этой области.

Эта основная осциллирующая и вращающаяся полоса и объединенная полоса (2,0 – 10,1°) образуют то, что в литературе принято называть полосой

поглощения 4,3 мкм. Интенсивность этой полосы настолько велика, что солнечный свет в диапазоне длин волн 4,2-44 мкм полностью поглощается в вертикальном столбе атмосферы ниже 20 км над уровнем моря.

Кроме полос 4,3 и 15 мкм, CO_2 имеет полосы поглощения с центром на 10,4; 944; 5,2; 48; 27; 20; 1,6; 1,4 мкм и 1,24 Полоса поглощения центрирована на 0,78 мкм, со слабой полосой на 0,78 мкм. Ширина всех полос составляет приблизительно 0,1 мкм.

IX.В.3. ОЗОН

Электронные переходы в молекуле озона образуют полосы Хартли и Хьюгенса в ультрафиолетовой области спектра (длины волн короче 340 нм) и полосу Шапюи при 450-750 нм.

Обертоны и сложные частоты образуют колебательные и вращательные полосы, которые вместе образуют сложные полосы поглощения с центром в районе 5,75, 4,75, 3,95, 3,26 и 2,7 мкм. Ширина каждой полосы составляет около 0,1 мкм. Самая сильная полоса находится на 4,75 мкм.

Полоса 9,6 мкм лежит в центре длинноволнового окна прозрачности атмосферы 8-13 мкм и играет важную роль в поглощении солнечного излучения атмосферным озоном. Его центральная часть, шириной около одного микрона в вертикальном столбе атмосферы, поглощает около половины солнечного излучения. Обе области поглощения озона имеют очень насыщенные линии.

IX.В.4. КИСЛОРОД

Молекулярный кислород имеет сильные электронные полосы в ультрафиолетовой части и относительно слабые полосы в красной и ближней инфракрасной частях. Восемь полос в красной части находятся между 0,64 – 0,76 мкм. В ближней инфракрасной области молекула кислорода имеет две заметные полосы, расположенные вокруг длин волн 1,0674 мкм и 1,2683 мкм.

IX.C. МОЛЕКУЛЯРНОЕ РАССЕЯНИЕ СВЕТА

Теоретические и экспериментальные исследования молекулярного рассеяния света показали, что оно тесно связано с молекулярной акустикой, ветвью молекулярной физики, а также с физикой аморфного и кристаллического состояний вещества.

Молекулярное рассеяние электромагнитных волн описывается развитием оптических неоднородностей на рассеивающей поверхности материала и в рассеивающей среде.

Условия возникновения неоднородностей многообразны. Оптические неоднородности в среде могут быть вызваны твердыми включениями первого элемента во второй элемент, например, инородными частицами в кристалле, частицами H_2O и твердыми загрязнениями в среде. С другой точки зрения, рассеяние света может наблюдаться даже в материалах, не затронутых инородными включениями, из-за статистических свойств теплового переноса элементов.

Согласно теории молекулярного рассеяния Кабанна-Релея, коэффициент объемного рассеяния в газе может быть выражен следующим уравнением:

$$2. \quad \sigma_R(\lambda) = \frac{8\pi^3(m_c^2-1)(6+3\Delta)}{3N\lambda^4(6-\Delta)},$$

где N – количество молекул в единице объёма,
 m_c – показатель преломления среды,
 Δ – условие депolarизации рассеянного излучения (для молекул воздуха $\approx 0,35 \text{ мкм}$)

Из уравнения вытекает, что по определенной величине $\sigma_R^0(\lambda_0)$ на определенной длине волны λ_0 при температуре и давлении атмосферы P_0 и T_0 можно определить $\sigma_R(\lambda)$ для всех возможных λ, P, T по формуле:

$$2.1. \sigma_R(\lambda) = \sigma_R^0(\lambda_0) \frac{P_0 T_0}{P T} \left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2$$

Коэффициент общего σ и обратного молекулярного рассеяния связаны отношением:

$$2.2. \sigma_{R,\pi}(\lambda) = 0,119\sigma_R(\lambda)$$

Используя эту формулу, можем определить $\sigma_R(\lambda)$ из измеренного значения $\sigma_{R,\pi}(\lambda)$, что позволяет определить плотность атмосферы на расстоянии.

Из-за молекулярного рассеяния происходит расширение диапазона излучения по сравнению с диапазоном излучения источника (из-за эффекта Доплера). Частотный сдвиг этого диапазона относительно мал в атмосферных условиях Земли.

IX.D. РАССЕЯНИЕ И ПОГЛОЩЕНИЕ АЭРОЗОЛЯМИ

Рассеяние световых волн в атмосфере Земли тесно связано и зависит от временной и пространственной изменчивости макроскопических элементов атмосферного материала.

Поглощение световых волн определяется мнимой частью показателя преломления χ аэрозольного материала: если $\chi\rho < 0,1$, то поглощение электромагнитного излучения материалами с "прозрачными" частицами фактически не влияет на коэффициент рассеяния, а общий коэффициент пропорционален χ , где коэффициент пропорционален $\rho = \frac{2\pi a}{\lambda}$. Таким образом, поглощение оптического излучения конденсатом в диапазоне длин волн 0,3-13 мкм проявляется только в грубой дымке и облачности. В тумане и дымке в коротковолновом диапазоне $\rho < 15$ ($\lambda = 0,3 - 4$ мкм) и в длинноволновом диапазоне $\rho < 1$ ($\lambda \geq 8$ мкм) поглощение зависит от количества твердых частиц с сильными молекулярными полосами поглощения.

Х. РАЗНОВИДНОСТИ ЛАЗЕРОВ

Лазеры, применяющиеся для зондирования, разделяются по типу активной среды. Они могут быть:

- газовые
- жидкостные
- твердотельные
- полупроводниковые.

Далее будут рассмотрены все типы лазеров.

Х.А. ГАЗОВЫЕ ЛАЗЕРЫ

В газовом лазере активная среда находится в газообразном состоянии. Поскольку среда лазера - это газ, он хранится в плазменной трубке, оснащенной электродами, подходящими для разряда, чтобы вызвать ионизацию, и окруженной диэлектрическим зеркалом. Газовые лазеры кажутся простыми устройствами, поскольку они не требуют базовой подготовки генерирующей среды, как твердые насыщающиеся лазеры. Однако в действительности это сложные устройства, требующие оптимизации газовой смеси, параметров газовой выделенности и расположения зеркал и сосудов. Также требуется соответствующая конструкция, чтобы создать правильные условия для инверсии групп. Кроме того, при газовом разряде выделяется тепло, которое необходимо рассеивать, чтобы избежать негативного воздействия на газовый разряд или оптические элементы.

Газовые лазеры можно классифицировать как атомные, молекулярные или ионные лазеры. В атомных лазерах среда генерации содержит электрически нейтральные атомы; He-Ne лазеры являются хорошим примером этой группы. Молекулярные лазеры используют молекулы в качестве генерационной среды, например, лазеры на диоксиде углерода, монооксиде

углерода и азоте. Важные ионные лазеры, такие как аргоновый и криптоновый лазеры, используют ионизированные газы в качестве активной среды для лазера. Интересно, что гелиевый и кадмиевый лазеры используют ионы металлов в качестве активной среды для лазера.

Газовые оптические квантовые генераторы (лазеры) обладают рядом преимуществ:

- Возможность длительной работы при комнатной температуре в отсутствие устройств охлаждения;
- Большой уровень монохроматичности (спектральная ширина излучения гелий-неонового ОКГ может достигать до единиц герц);
- Значительная устойчивость и способность воспроизведения частоты, а кроме того, высокий уровень пространственной и временной когерентности;
- Малый угол расходимости луча;
- Малая восприимчивость к изменениям температуры среды;
- Обширный диапазон рабочих частот.

Х.А.1. НЕ-НЕ ЛАЗЕР

Это четырехступенчатый атомный лазер, изготовленный из смеси газов гелия и неона. Он работает на нескольких длинах волн, наиболее популярный выход - 633 нм (красный). Другие длины волн - 543 нм (зеленый), 594 нм (желтый), 612 нм (оранжевый) и 1523 нм (инфракрасный). Хотя неон является производным газом, он представляет собой незначительный компонент (15% от общего количества), большую долю составляет гелий. Атомы гелия возбуждаются в более высокое энергетическое состояние электрическим разрядом и наполняются столкновениями электронов. Характерной

особенностью гелия является то, что первые возбужденные состояния 2^1S_1 и 2^1S_0 являются метастабильными (время жизни ~ 1 с) и не допускают оптических переходов в основное состояние 1^1S_0 , поскольку нарушают правила выборов для оптических переходов. В результате газовых разрядов эти состояния заселяются столкновениями электронов. Верхние энергетические уровни атомов гелия практически идентичны уровням атомов неона (в пределах тепловой энергии kT). Помимо столкновений электронов, очень важную роль играют атомные столкновения. Возбужденные атомы гелия возбуждают атомы неона на более высокий энергетический уровень, после чего они теряют энергию и переходят в основное состояние. Эти два процесса приводят к изменению населенности в системе неона. Ниже приведена простая диаграмма энергетических уровней для гелий-неонового лазера, которая показывает только некоторые из основных переходов: с двумя низшими уровнями энергии лазера можно получить много длин волн излучения; с одним высшим уровнем энергии можно получить много длин волн излучения. Видно, что лазерное излучение с длиной волны 632 нм производится между энергетическими уровнями $3s$ и $2p$.

Данный вид лазерных систем широко распространён на момент написания работы по следующим причинам: существует и реализуется высоко оптимизированный способ производства в промышленных масштабах; тепловой режим, близкий к стандартным условиям, не ограничивает срок службы и обеспечивает простоту использования.

Главный недостаток гелий-неонового лазера в малой мощности излучения.

Х.А.2. УГЛЕКИСЛОТНЫЙ ЛАЗЕР

CO_2 – лазер (углекислотный лазер) - это молекулярный газовый лазер с длинноволновым инфракрасным спектром. В качестве усиливающей среды в нем используется смесь газов, включая углекислый газ (CO_2), гелий (He), азот (N_2) и иногда водород (H_2), кислород (O_2), водяной пар и ксенон (Xe). Лазер

электрически возбуждается газовым разрядом с помощью постоянного тока или переменного тока (например, 20-50 кГц).

Несмотря на возможность возбуждать молекулы углекислого газа непосредственно над лазерным уровнем, наиболее эффективным методом является использование резонансной передачи энергии от молекул азота. При помощи электрического импульса молекулы азота возбуждаются до метастабильного колебательного уровня, и эта энергия возбуждения передается молекулам углекислого газа при столкновении с ними. Провзаимодействовавшие молекулы CO_2 принимают участие в лазерном переходе. Гелий отвечает за дезактивацию и рассеивание тепла в нижней части лазера. Другие компоненты, такие как водород и водяной пар, помогают повторно окислять монооксид углерода (CO , образующийся в процессе разряда) до CO_2 (особенно в герметичных трубчатых лазерах).

Этот вид лазера является наиболее используемым в лидарных системах, благодаря эффективной работе как в постоянном так и в импульсном режимах.

Х.В. ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ЛАЗЕРЫ

Твердотельный лазер - это лазер с твердотельным усилителем, таким как кристалл или стекло, легированное ионами редкоземельных или переходных металлов. Полупроводниковые лазеры также являются твердотельными лазерами, но не обязательно в том смысле, который подразумевается под этим термином.

Твердотельные лазеры, легированные ионами (иногда называемые лазерами с легированными изоляторами), могут быть в виде объемных лазеров, волоконных лазеров или других типов волноводных лазеров.

Выходная мощность твердотельных лазеров может варьироваться от нескольких милливатт до нескольких киловатт (в более мощных типах).

Первым твердотельным лазером был импульсный рубиновый лазер, продемонстрированный Мейманом в 1960 году, который фактически был первым из всех лазеров. Однако с тех пор предпочтение отдавалось другим твердотельным усилителям из-за их более высокой производительности. Основной проблемой рубиновых лазеров является их трехуровневая природа.

Среди данного вида лазеров активно используются в лидарных системах следующие типы:

- Лазеры на стёклах, активированных неодимом
- Лазеры на рубиновых кристаллах
- Лазеры на кристаллах иттрий-алюминиевого граната (ИАГ)

Х.В.1. ЛАЗЕРЫ НА СТЁКЛАХ, АКТИВИРОВАННЫХ НЕОДИМОМ

Лазеры на стёклах. Лазерные стекла (или лазерно-активные стекла) - это оптические стекла (в основном силикатные и фосфатные), допированные лазерно-активными веществами (обычно трехвалентными редкоземельными ионами, такими как Nd^{3+} , Yb^{3+} , Er^{3+} , Tm^{3+} , Pr^{3+} и Ho^{3+}). В принципе, стекла также могут быть допированы лазерно-активными ионами переходных металлов, но это не распространено, и такие ионы в основном используются в лазерных кристаллах.

Х.В.2. ЛАЗЕРЫ НА РУБИНОВЫХ КРИСТАЛЛАХ

Рубиновые лазеры являются одними из первых. Рубиновый лазер представляет собой кристалл сапфира (Al_2O_3), в который введены ионы хрома (Cr^{3+}). Количество примесей хрома варьируется. Обычно для получения энергии используются кристаллы розового рубина с весовым содержанием (Cr_2O_3) около 0,05%, что соответствует $1,6 \cdot 10^{19}$ ионов хрома на кубический сантиметр.

Х.В.3. ЛАЗЕРЫ НА КРИСТАЛЛАХ ИТТРИЙ-АЛЮМИНИЕВОГО ГРАНАТА (ИАГ)

ИАГ-лазеры. В лазерных системах этого типа примесный ион Nd^{3+} вводится в кристалл $Y_2Al_5O_{12}$. Благодаря низкому энергетическому пределу возбуждения и хорошей теплопроводности ИАГ, активированные неодимом, могут работать с высокой частотой повторения, значительно превышающей пределы, допустимые для стекла и рубина, и с достаточно высоким коэффициентом полезного действия – 3,3% для излучения в постоянном режиме. Электромагнитное излучение лазера имеет длину волны приблизительно 1,06 микрона.

Х.С. ЖИДКОСТНЫЕ ЛАЗЕРЫ НА КРАСИТЕЛЯХ

Лазер на красителях - это лазер, использующий краситель (обычно жидкий) в качестве среды усиления лазера. Большинство лазерных красителей основано на органических молекулах, используемых в жидкой форме в виде раствора, хотя существуют также твердые и парообразные лазерные красители красители.

Лазерный краситель, используемый в качестве усиливающей среды имеет широкую полосу усиления, благодаря чему хорошо регулируется по длине волны и может генерировать ультракороткие импульсы с блокировкой пассивного режима. В зависимости от лазерного красителя может излучаться широкий диапазон длин волн от ультрафиолетового до ближнего инфракрасного.

Время жизни в состоянии возбуждения обычно составляет несколько наносекунд, как у полупроводниковых лазеров, но на несколько порядков короче, чем у твердотельных лазеров на диэлектрике. Поэтому лазеры на красителях не подходят для непрерывной или длинной импульсной накачки с Q-коммутиацией и могут сохранять энергию только в течение очень короткого периода времени. Однако импульсное возбуждение с помощью лазеров

накачки с Q-переключением или ламп-вспышек может создавать сильные импульсы в лазерах на красителях.

Особенно при импульсном возбуждении коэффициент усиления на единицу длины может быть очень высоким (порядка 10^3 см^{-1}).

Эффективность преобразования мощности при лазерном возбуждении обычно составляет от 10% до 30%, а при возбуждении вспышкой обычно намного ниже.

Существует множество типов лазерных красителей, охватывающих в общей сложности огромный диапазон длин волн. Такие названия, как экзалит, кумарин, родамин, пирометан, пиридин, флуоресцеин, пиридин, стирил и т.д., часто относятся не к точно определенным веществам, а к целым семействам красителей с немного разными химическими структурами и немного разными диапазонами длин волн, отличающимися дополнительным номером для их различения. Например, кумарины 2, 47, 102 или 153 могут быть использованы в лазерах в сине-зеленой области спектра.

X.D. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛАЗЕРЫ

Полупроводниковые лазеры - это твердотельные лазеры на основе полупроводниковых усилителей, оптическое усиление которых обычно достигается за счет индуцированного излучения на межзонных переходах с высокой плотностью носителей в полосе проводимости.

В отсутствие накачки большинство электронов находится в валентной полосе. Луч накачки с энергией фотона, немного превышающей энергию зазора, возбуждает электроны до высокого состояния в полосе проводимости, откуда они быстро распадаются до состояния вблизи дна полосы проводимости. В то же время дырки, образовавшиеся в валентной полосе, перемещаются в верхнюю часть валентной полосы. Электроны в полосе проводимости могут рекомбинировать с этими дырками и испускать фотоны, близкие к энергии зазора. Этот процесс также может быть стимулирован

падающим фотоном с соответствующей энергией. Количественное объяснение может быть основано на распределении Ферми-Дирака электронов в двух полосах.

Этот процесс действителен только для полупроводников с прямой полосовой щелью. В полупроводниках с непрямым зазором (например, в кремнии) электроны и дырки в полосе проводимости приобретают совершенно разные номера волн, поэтому фотопреобразование не может происходить из-за проблем сохранения импульса.

Большинство полупроводниковых лазеров - это лазерные диоды, которые возбуждаются при прохождении тока через область, где встречаются n- и p- легированные полупроводниковые материалы. Однако существуют также полупроводниковые лазеры с оптической накачкой, где носители генерируются поглощенным возбуждающим светом, и квантово-каскадные лазеры, использующие внутриволостные переходы.

Наиболее часто в лазерах данного вида используются следующие полупроводники:

- GaAs (арсенид галлия)
- InGaP (фосфид индия-галлия)
- GaN (нитрид галлия)
- InGaAs (арсенид индия-галлия)
- GaInNAs (нитрид арсенида индия-галлия)
- InP (фосфид индия)
- GaInP (фосфид индия галлия)

- Водоросли (арсенид алюминия-галлия)
- Зазор (фосфид галлия)

XI. КОЭФФИЦИЕНТ ОСЛАБЛЕНИЯ

Коэффициент ослабления - это безразмерная физическая величина, которая характеризует изменение интенсивности излучения при прохождении через среду. Он определяется как отношение изначальной интенсивности излучения к интенсивности излучения после прохождения через среду. Коэффициент ослабления зависит от физических свойств среды, таких как плотность, толщина, состав, а также от энергии излучения. Например, для рентгеновского излучения коэффициент ослабления увеличивается с увеличением плотности среды и толщины поглощающего материала.

$$2.3. \sigma = \frac{\Phi_0}{\Phi}$$

XII. МЕТОДЫ РАСЧЁТА ВЛИЯНИЯ ФОНОВОЙ ЗАСВЕТКИ

Функциональная связь между параметрами приемопередающей системы лидара и интенсивностями принимаемого с различных расстояний локационного сигнала выглядит следующим образом:

$$3. P(r) = \eta P_0 A \frac{c\tau}{2} r^{-2} \beta_{\pi}(r) \exp\left[-2 \int_0^r \alpha(r') dr'\right],$$

$P(r)$ – мощность эхо-сигнала;

P_0 – мощность зондирующего импульса;

A – площадь приёмной антенны лидара;

r – расстояние от лидара до зондирующего объёма атмосферы;

c – скорость света;

τ – длительность импульса;

$\beta_{\pi}(r)$ – сечение взаимодействия в направлении назад; экспоненциальный член характеризует квадрат прозрачности слоя атмосферы между лидаром и зондируемым объемом;

$\alpha(r')$ – объёмный коэффициент ослабления;

η – калибровочная константа.

Использование лидаров предполагает решение проблемы интерпретации лидарной информации, которая усложняется при зондировании слабо замутненной атмосферы. В частности, при измерении и интерпретации сигналов обратного рассеяния малой мощности существенно возрастает роль фоновой засветки.

Целью настоящей работы является развитие методов, необходимых для обработки эхо-сигналов при зондировании атмосферы в условиях повышенной прозрачности воздуха.

Известно, например, что обработка лидарных данных проводится с использованием метода последовательных приближений. Это негативно сказывается на оперативности обработки. В настоящей работе предлагается метод, избавленный от данного недостатка.

Для наших расчётов мы немного упростим лидарное уравнение следующим образом:

$$3.1. P_i = P^* + \frac{B}{R_i^2} e^{-2\sigma R_i}.$$

$$3.2. B = A\beta$$

A – постоянная лидара,

β – коэффициент обратного рассеяния,

σ – коэффициент ослабления.

P – мощность сигнала обратного рассеяния,

P_* – мощность солнечного излучения, рассеянного атмосферой в направлении на приемное устройство лидара,

R – расстояние между лидаром и i -м рассеивающим элементом.

Для уменьшения уровня случайных ошибок восстановления концентраций газов из данных зондирования атмосферы методом дифференциального поглощения, вызванных разными аппаратурными и атмосферными шумами, традиционно используют схемы усреднения данных лазерного зондирования. Согласно основной формуле лазерного зондирования атмосферных газов методом дифференциального поглощения, усреднение данных зондирования можно проводить тремя методами:

$$4. \quad 2\Delta\tau(z) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^N \ln\left(\frac{P_{0j}(z)}{P_{1j}(z)}\right);$$

$$4.1. \quad \overline{2\Delta\tau(z)} = \ln\left(\frac{\sum_j P_{0j}(z)}{\sum_j P_{1j}(z)}\right);$$

$$4.2. \quad 2\Delta\tau(z) = \ln\left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^N \frac{P_{0j}(z)}{P_{1j}(z)}\right),$$

где n – число циклов накопления пар данных зондирования в линии (P_0)

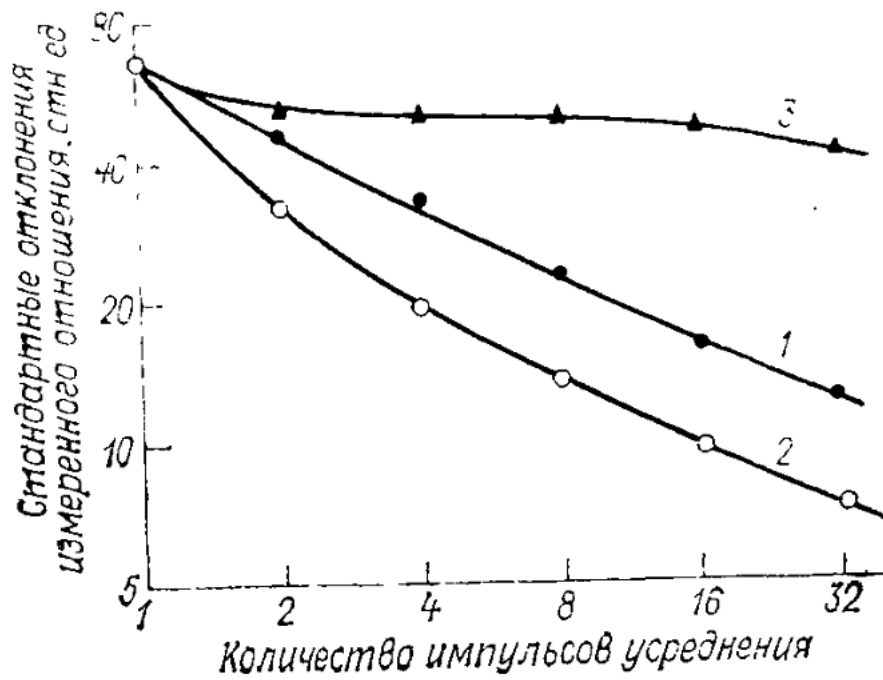


Рисунок 4 Численные оценки измерений стандартных отклонений.

и вне линии (P_1) поглощения атмосферного газа. Численные оценки измерений стандартных отклонений представлены на рисунке. На нём видно, что вторая схема является наиболее эффективной.

ХП.А. РАСЧЁТ ФОНОВОЙ ЗАСВЕТКИ

$$P_{i+1} = P^* + \frac{B}{R_{i+1}^2} \exp(-2\sigma R_{i+1});$$

$$P_{i+2} = P^* + \frac{B}{R_{i+2}^2} \exp(-2\sigma R_{i+2});$$

$$\frac{(P_i - P^*)R_i^2}{(P_{i+1} - P^*)R_{i+1}^2} = \frac{(P_{i+1} - P^*)R_{i+1}^2}{(P_{i+2} - P^*)R_{i+2}^2} = \exp(2\sigma h),$$

где $h = R_{i+1} - R_i$ – шаг. С учётом этого можно минимизировать уравнение

$$\delta_*^2 = \sum_{i=1}^n a_i P^{*2} + b_i P^* + c_i;$$

$$5. \quad a_i = R_{i+1}^4 - R_i^2 R_{i+2}^2,$$

$$5.1. \quad b_i = (P_i + P_{i+2})R_i^2 R_{i+2}^2 - 2P_{i+1}R_{i+1}^4,$$

$$5.2. \quad c_i = P_{i+1}^2 R_{i+1}^4 - P_i P_{i+2} R_i^2 R_{i+2}^2,$$

$$5.3. \quad P^{*3} + aP^{*2} + bP^* + c = 0,$$

где

$$5.4. \quad a = \frac{3 \sum_{i=1}^n a_i b_i}{2 \sum_{i=1}^n a_i^2},$$

$$5.5. \quad b = \frac{\sum_{i=1}^n a_i (2c_i + a_i)}{2 \sum_{i=1}^n a_i^2},$$

$$5.6. \quad c = \frac{\sum_{i=1}^n b_i c_i}{2 \sum_{i=1}^n a_i^2},$$

это уравнение Кардано, его решение:

$$6. \quad P^* = a_* + b_* - \frac{a}{3},$$

где

$$6.1. \quad a_* = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}},$$

$$6.2. \quad b_* = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}},$$

$$6.3. \quad Q = \left(\frac{p}{3}\right)^3 + \left(\frac{q}{2}\right)^2,$$

$$6.4. \quad p = -\frac{a^2}{3} + b,$$

$$6.5. \quad q = 2\left(\frac{a}{3}\right)^3 - \frac{ab}{3} + c.$$

ХП.В. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ОСЛАБЛЕНИЯ:

Будем минимизировать сумму

$$\delta^2 = \sum_{i=1}^n \left(C - S_i - 2\sigma \int_{R_0}^{R_i} S dR \right)^2,$$

где

$$S = (P - P_*)R^2.$$

$$P_1 = P^* + \frac{B}{R_1^2} \exp(-2\sigma R_1);$$

$$P_2 = P^* + \frac{B}{R_2^2} \exp(-2\sigma R_2);$$

...

$$P_n = P^* + \frac{B}{R_n^2} \exp(-2\sigma R_n);$$

$$P_{n+1} = P^* + \frac{B}{R_{n+1}^2} \exp(-2\sigma R_{n+1});$$

Просуммировав систему получим:

$$\sum_{i=1}^n (P_i - P^*)R_i^2 = B \exp(-2\sigma R_1) \{1 + \exp(-2\sigma h) + \dots + \exp(-2\sigma(n-1)h)\}$$

Если обозначить

$$S_n = 1 + \exp(-2\sigma h) + \dots + \exp(-2\sigma(n-1)h),$$

то

$$S_n = \frac{1 - \exp(-2\sigma nh)}{1 - \exp(-2\sigma h)},$$

причём

$$\sum_{i=1}^n (P_i - P^*)R_i^2 = \frac{(P_1 - P^*)R_1^2 - (P_{n+1} - P^*)R_{n+1}^2}{1 - \exp(-2\sigma h)},$$

то есть следует минимизировать сумму

$$\sum_{j=1}^n \{C - (P_{j+1} - P^*)R_{j+1}^2 - \Delta \sum_{i=1}^n (P_i - P^*)R_i^2\},$$

где C – неизвестная постоянная,

$$7. \quad \Delta = 1 - \exp(-2\sigma h),$$

поэтому

$$7.1. \quad \sigma = -\frac{\ln(1-\Delta)}{2h}.$$

Для постоянной Δ получается равенство:

$$7.2. \quad \Delta = \frac{\sum_{j=1}^n S_{j+1} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^j S_i - n \sum_{j=1}^n S_{j+1} \sum_{i=1}^j S_i}{n \sum_{j=1}^n (\sum_{i=1}^j S_i^2) - (\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^j S_i)^2},$$

где

$$7.3. S_{j+1} = (P_{j+1} - P^*)R_{j+1}^2$$

$$7.4. S_i = (P_i - P^*)R_i^2.$$

ХШ. ХОД РАБОТЫ

ХШ.А. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ИХ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ

Нами был получен массив данных в формате программы LIDAR. Ввиду крайне неудобного опыта использования данной программы, была написана программа на языке программирования Python (приложение), экспортирующая данные в excel файл, где была произведена дальнейшая обработка.

Таблица 1 Часть данных после переноса в excel в качестве примера.

R	1	2	3	4	5	6
	12:48:10	12:48:11	12:48:12	12:48:14	12:48:15	12:48:19
-1911	1,6	1,8	2	2,2	2,4	3
-1903,51	36,66	35,9	37,58	36,52	35,84	36,88
-1896,01	36,66	35,9	37,58	36,52	35,84	36,88
-1888,52	36,66	35,9	37,58	36,52	35,84	36,88
-1881,02	36,28	36,6	36,78	37,02	37,18	36,8
-1873,53	37	36,26	36,66	36,58	37,36	36,62
-1866,03	37,4	36,48	37,14	37,3	38,18	36,62
-1858,54	38,2	36,62	36,22	37,22	37,66	36,68

В результате мы получили данные в виде excel таблицы (Таблица 1), ячейки которой хранили информацию о мощности сигнала на расстоянии (от -1911м до 13415,89м, дискретизированное на 2046 значений с шагом ~7,5м), которое задаёт левый столбец во время(29 значений от 12:48:10 до 12:48:49), которое задаёт верхняя строка.

ХШ.В. НАГЛЯДНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ДАННЫХ

Далее для наглядности и лучшего понимания дальнейших действий

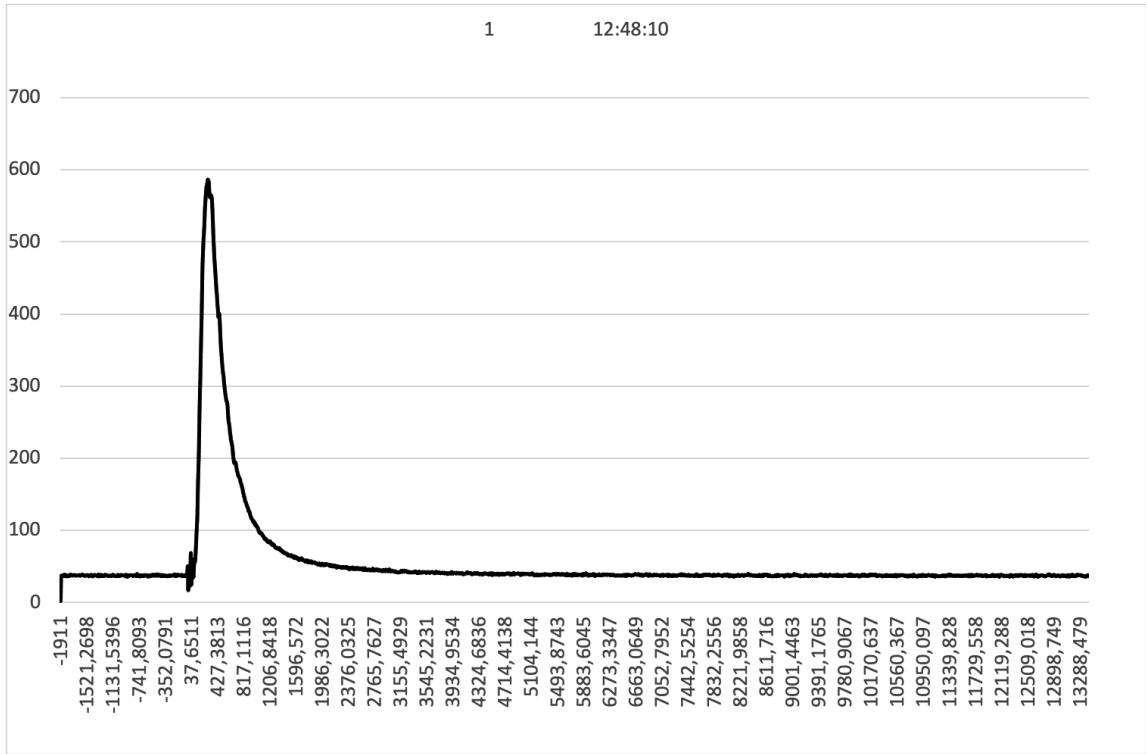


Рисунок 5.1 График полученных данных.

были построены графики сигнала.

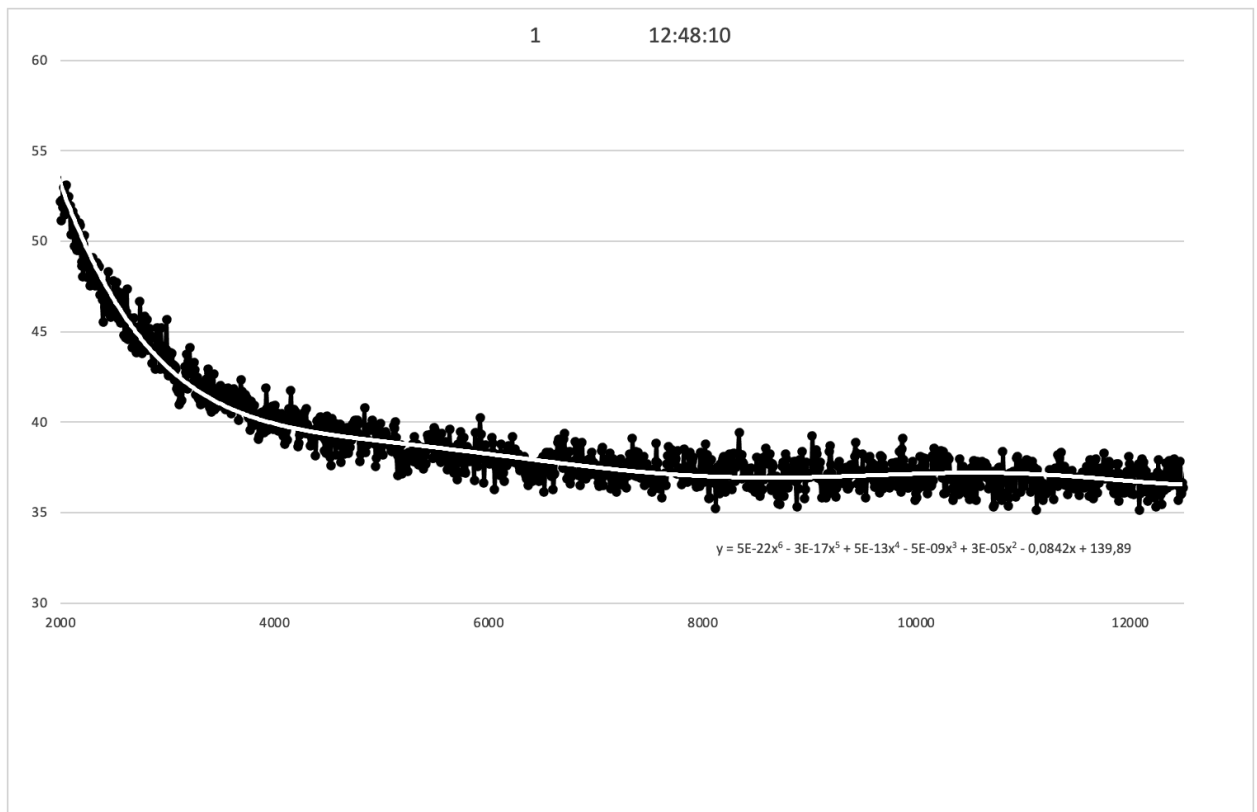


Рисунок 5.2 Интересующая нас часть графика.

ХШ.С. РАБОТА С ДАННЫМИ

Далее были произведены следующие последовательные вычисления. Приведём пример для первого времени для начала на расстоянии 1700м-13000м.

Таблица 2 Последовательность расчётов.

a _i	b _i	c _i	a	b	c	p
325244139,1	2,04964E+1 ⁻²	1,18995E+14	453,81 ⁻	460717,1	5,45711E+1 ⁻³	529364,88 ³
328115761,8	8,56839E+1 ⁻²	5,01155E+14				
331000005,7	1,4198E+13	8,24107E+14 ⁻				
333896870,7	1,18753E+1 ⁻³	6,86069E+14				
336806357	6,33016E+1 ⁻²	3,71934E+14				
338681275,8	1,82508E+1 ⁻³	1,03174E+15 ⁻				
343733183,3	-2,6438E+12	1,50261E+14				

	Q2	a*	b*	P*	S _i
4571E+13	7,44499E+26	37930,4	-4,65202	38,07701	59474003,55
					59940688,92
					57462320,76
					59807932,54
					58170504,56
					54381062,45
					56619920,55

S _{j+1}	sumSi	delta
59940688,9	59474003,55	-0,00267389
57462320,8	119414692,5	-0,00267389
59807932,5	176877013,2	-0,00267389
58170504,6	236684945,8	-0,00267389
54381062,4	294855450,3	-0,00267389

56619920,5	349236512,8	-0,00267389
58029837,1	405856433,3	-0,00267389

Аналогичные вычисления были произведены для каждого из 29 временных точек. В итоге мы получили наборы конечных данных P^* – фоновая засветка и σ – коэффициент ослабления. Мы усреднили данные по всем временным точкам и получили зависимость $\sigma(P^*)$, результаты представлены на графике. Зависимость удобно будет описывается

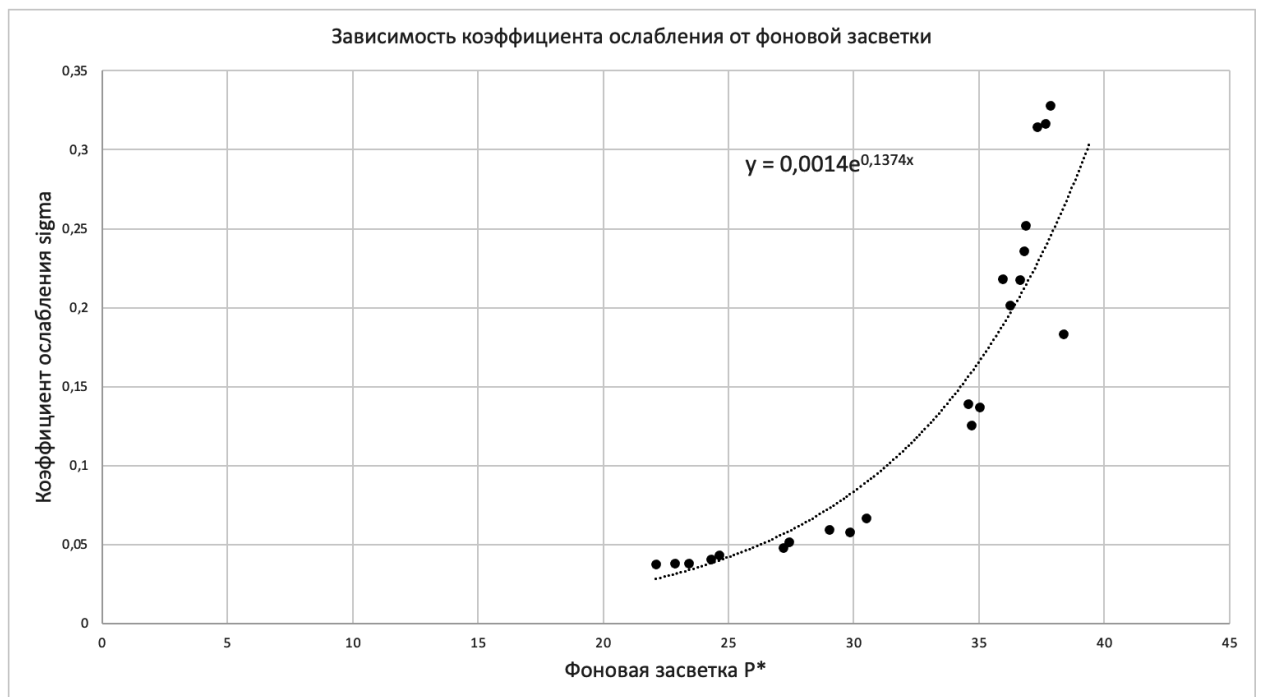


Рисунок 6.1.

экспоненциальной линией тренда.

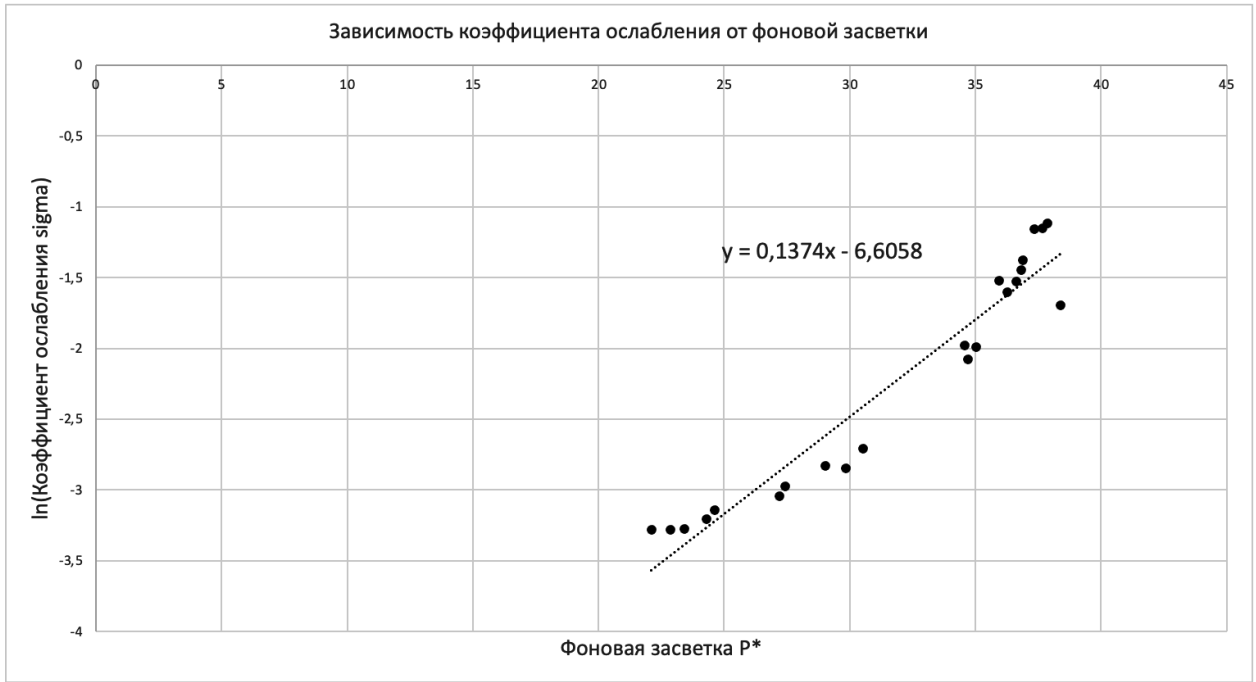


Рисунок 6.2.

Это доказывает график от логарифма полученных значений:

Таблица 3.1.

Среднее значений P* по всем временным точкам фоновой засветки для				
dR	11,5	1	4	6
P*	34,57215	5,180138	12,98826	18,9336

Таблица 3.2.

Среднее значений P* по всем временным точкам на расстоянии R=				
dR	0,5	1	2	2,5
P*	23,38814	32,63835	35,4683	34,12016

Далее были произведены вычисления для: $R = 1700 м, R = 10000 м, \Delta R = 1 м, \Delta R = 4 м, \Delta R = 6 м, \Delta R = 8 м$ и вычислены значения фоновой засветки для: $R = 10500 м, \Delta R = 0,5 м, \Delta R = 1 м, \Delta R = 2 м, \Delta R = 2,5 м$

Также была определена зависимость коэффициента ослабления σ от

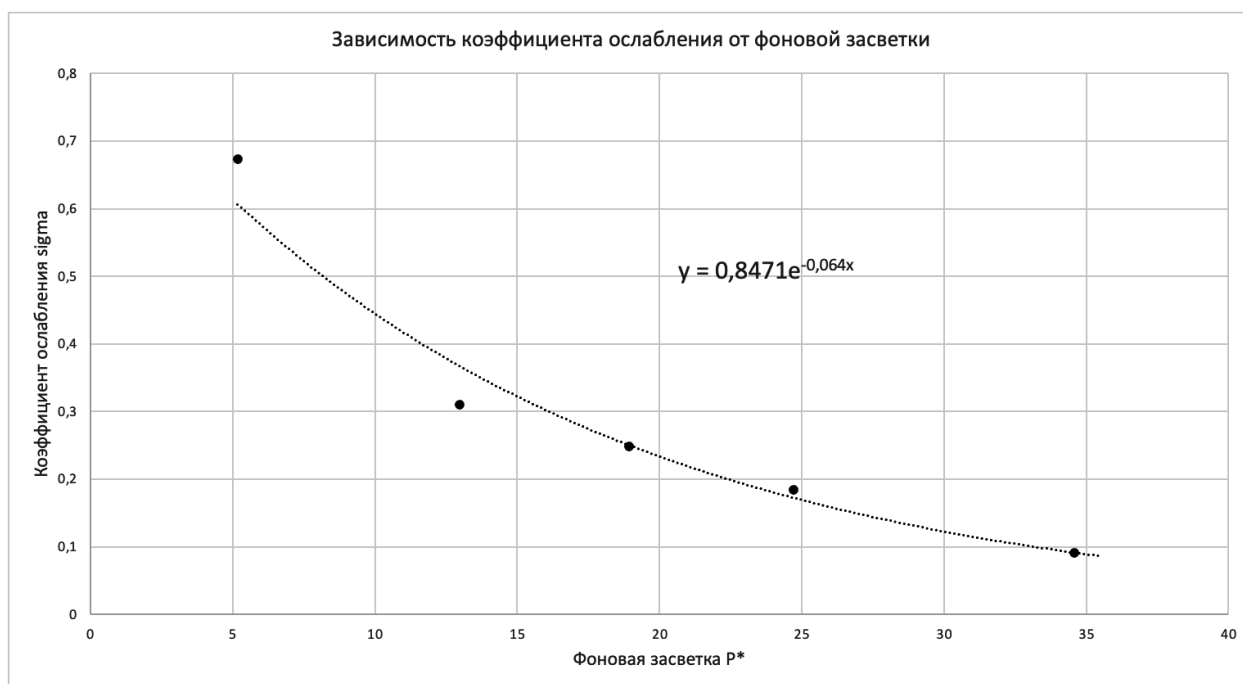


Рисунок 6.3.

фоновой засветки P^* для различных длин трассы dR .

Если обратить внимание на график зависимости коэффициента ослабления σ от длины трассы dR , можно заметить линию тренда,

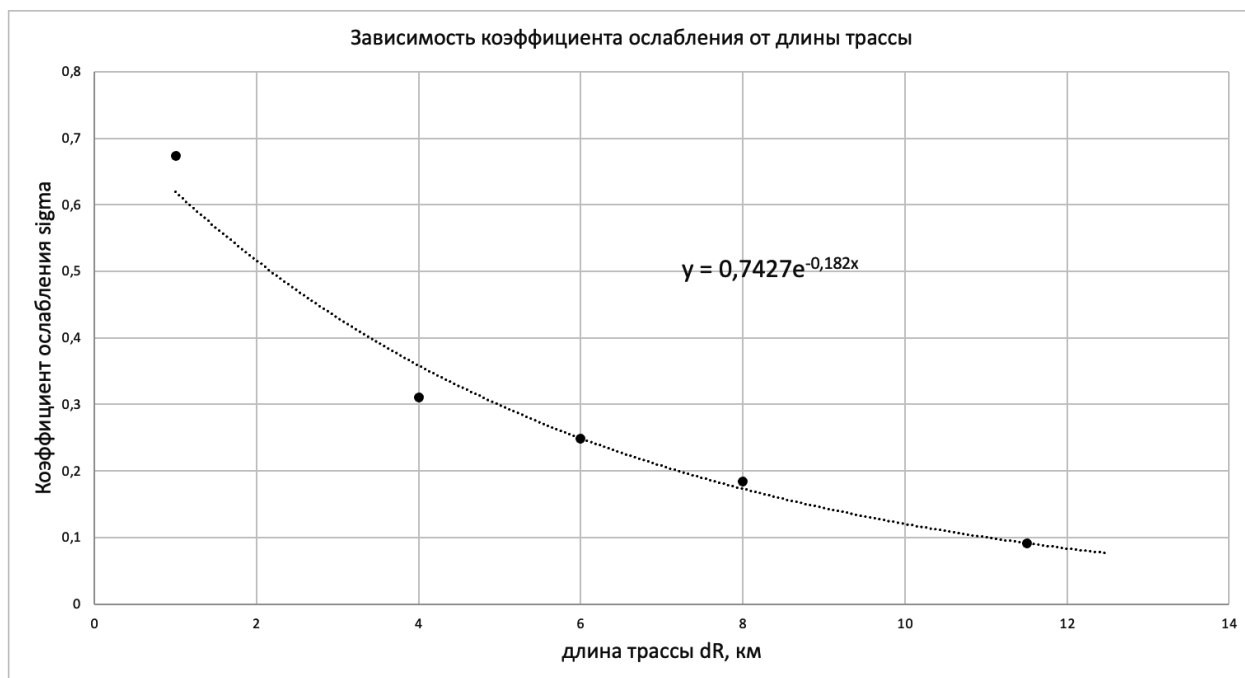


Рисунок 6.4.

описываемую обратной экспонентой.

Что доказывает прямая линия графика на логарифмическая оси

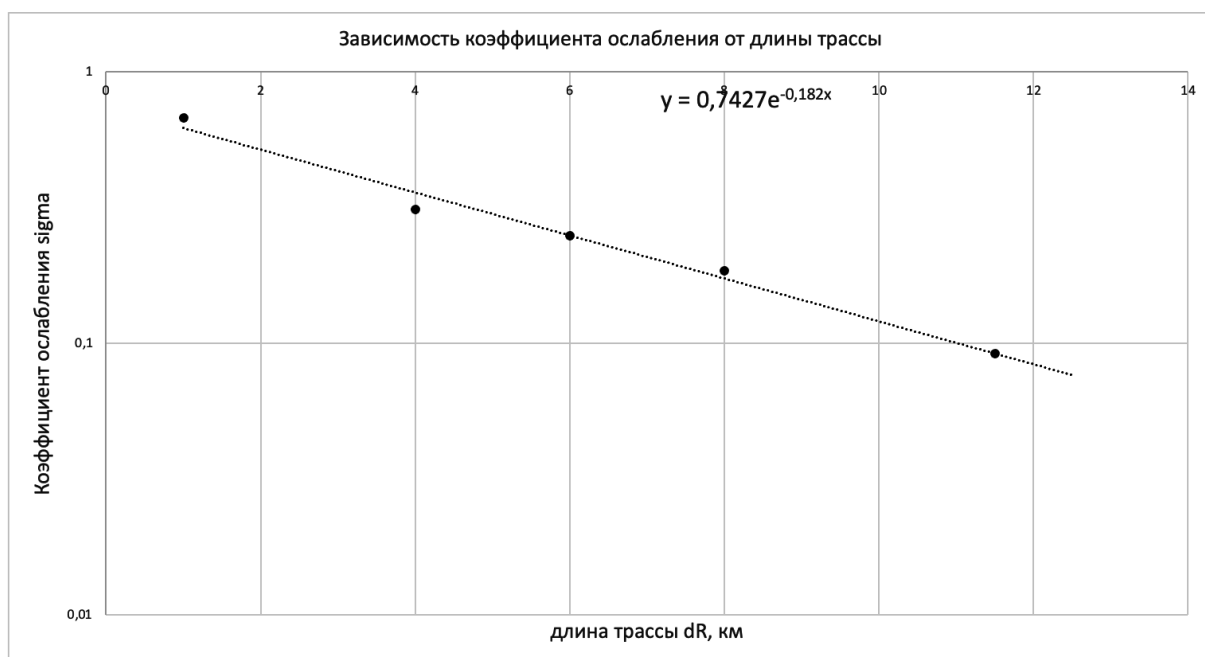


Рисунок 6.5.

значений:

Поскольку уже было выяснено, что коэффициент ослабления σ зависит от фоновой засветки был сделан вывод, что фоновая засветка прямо

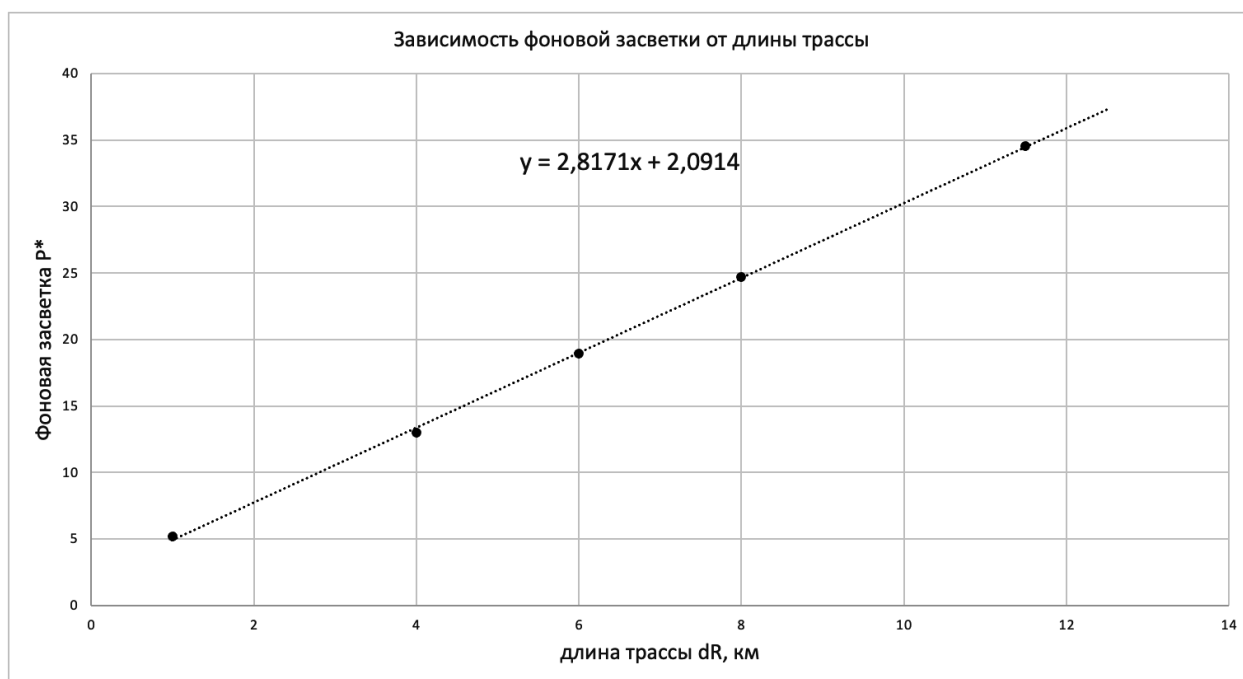


Рисунок 6.6.

пропорциональна длине трассы.

Зависимость же коэффициента ослабления σ от фоновой засветки P^* на рисунке 6.3 объясняется зависимостью от длины трассы

XIV. УСЛОВИЯ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ

1. Используемые лазерные источники должны обладать высокой монохроматичностью и стабильностью спектральной частоты излучения.

2. Спектральная частота излучения лазера с высокой степенью точности должна совпадать с выбранным участком линии поглощения атмосферного газа. Учитывая сдвиг линий поглощения давлением воздуха, настройку линии лазерного излучения разумнее проводить с помощью поглощающих ячеек-анализаторов (многоходовые кюветы или спектрофоны) при соответствующих давлениях в ячейках. Так, например, при зондировании на приземных трассах давление в ячейке-анализаторе должно соответствовать атмосферному. Для

схем высотного зондирования давление в поглощающих ячейках следует понизить до уровня 40-65 гПа.

3. В приёмной системе лазерного комплекса для зондирования атмосферных газов методом дифференциального поглощения необходимо использовать спектральные фильтры, отсекающие не только фоновое излучение, но и паразитные сигналы УСЭ, и число вращательного КР.

4. Зарегистрированные лидарные сигналы в первую очередь необходимо скорректировать с учетом нелинейности применяемых фоторегистраторов.

5. Для физически правильной интерпретации данных лидарных измерений нужно использовать устойчивые алгоритмы решения некорректных обратных задач.

6. При зондировании вдоль неоднородных трасс необходимо осуществлять коррекцию результатов из-за доплеровского уширения лидарного сигнала.

XV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Было проанализировано влияние фонового излучения на фиксируемый сигнал. Выявлена экспоненциальная зависимость коэффициента ослабления σ от фоновой засветки P^* и прямая пропорциональность в зависимости фоновой засветки от длины исследуемой трассы.

Результаты, полученные при выполнении работы показывают, что фоновая засветка сильно портит и следовательно информацию о исследуемом объекте, что становится особенно заметно на больших расстояниях. Например, при дистанционном исследовании загрязнения объемов воздуха, следует максимально исключить фоновую засветку из опыта, чтобы получить максимально достоверные данные.

ИСТОЧНИКИ

- [1] Wikipedia

- [2] Зуев В. Е. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы

- [3] Фелленберг Г. Загрязнение природной среды

- [4] Гусакова Н. В. «Химия окружающей среды» Ростов-на-Дону: Феникс, 2004, 192 с. ISBN 5-222-05386-5.

- [5] А.Д. Егоров, И.А. Потапова лидарная прозрачнометрия слабо замутненной атмосферы.

- [6] Седунов Ю. С. Атмосфера. Справочник (справочные данные, модели)

- [7] М. С. Сафанов, Г. В. Лисичкин. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова ТОМ 7, №7, 2001.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Программа на Python, написанная для переноса исходных данных в формат excel:

```
import pandas as pd
import numpy as np
fdata=[]
with open('Диплом результаты.txt', 'r') as f:
    lines = f.readlines()
    fdata.append(lines[98].split()[5:])
with open('Диплом результаты.txt', 'r') as f:
    lines = f.readlines()
    for k in range(29):
        fdata.append(lines[100+k].split())
fdata_T = list(zip(*fdata))
df=pd.DataFrame(fdata_T)
print(df)
df.to_excel('data.xlsx', index=False)
```