

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра физики

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

Бакалаврская

**На тему «Влияние солнечного излучения на определение
коэффициента ослабления для слабо замутнённой
атмосферы при лидарных измерениях»**

Исполнитель Тиханов Артур Вадимович

**Руководитель доктор физ.-мат. наук профессор Потапова Ирина
Александровна**

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой Бобровский Анатолий Петрович

(подпись)

Кандидат физико-математических наук, доцент

Анатолий Петрович Бобровский

«__» _____ 20__ г.

Санкт–Петербург

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. АТМОСФЕРА ЗЕМЛИ.....	6
1.2 Строение атмосферы	6
1.3 Состав атмосферы.....	11
ГЛАВА 2. ЗАГРЯЗНЕНИЕ АТМОСФЕРЫ.....	15
2.2 Аэрозоли.....	15
ГЛАВА 3. Зондирование атмосферы с помощью лазерных устройств.....	23
3.1 Аэрозольное поглощение фотонов.....	25
3.2 Аэрозольное рассеивание фотонов	27
3.3 Флуоресценция	28
3.4 Спонтанное комбинационное рассеивание	30
3.5 Резонансное рассеивание	32
3.6 Молекулярное рассеивание.....	34
3.7 Нелинейные эффекты	36
3.8 Характеристика лазерного излучения в атмосфере.....	38
3.8 Влияние солнечного излучения на лазерное зондирование	39
ГЛАВА 4. Приборы для лазерного зондирования атмосферы.....	41
4.1 Газовые лазеры	43
4.1.1 Криптоновый лазер	44
4.1.2 Гелий-неоновый лазер	45
4.1.3 Углекислотный лазер	46
4.2 Твердотельные лазеры	48
4.3 Полупроводниковые лазеры	50
4.5 Приёмники излучения	52
ГЛАВА 5 Схемы лидарного зондирования атмосферы.....	53
ГЛАВА 5 Современные лидарные системы	56

ГЛАВА 6.Определение коэффициента ослабления	63
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	67
ВЫВОД.....	67
БИБЛИОГРАФИЯ.....	68

Введение

Для представителя урбанистической цивилизации картина смога и струй дыма в атмосфере является настолько привычной, что не вызывает вопросов о безопасности жизни и здоровья. При этом без постоянного мониторинга невозможно поддержание благополучного состояния не только человека, но и всех живых существ.

Существует множество различных методов и средств мониторинга окружающей среды. Для более детального понимания сущности каждого из них необходима классификация. По методам ведения различают дистанционный, автоматический, химический, биологический и геофизический мониторинг. Существуют и более детальные классификации, а также разделения по другим признакам. В данной работе главным образом рассмотрим один из наиболее технологичных методов, относящихся к дистанционным.

Лидарное зондирование атмосферы – это измерение вертикального или горизонтального распределения физических параметров атмосферы (в т.ч. концентрации вредных примесей) при помощи лазерного луча. При реализации данного метода используется свойство рассеяния и преломления лазерного луча атмосферным воздухом, содержащим примеси. Преимущество данного способа зондирования заключается в очень малом времени отклика: даже при большом пути, проходимом лучом, данный временной промежуток составляет несколько микросекунд. Также необходимо отметить многофункциональность лидара: с помощью этого прибора есть возможность формировать двухмерную, а также трёхмерную модель окружающего пространства, изучать свойства рассеивания и поглощения воздушной среды, направление и скорость перемещения воздушных масс в атмосфере, кроме того, лидар использовался для измерения расстояния от Земли до Луны. Вместе с тем, данный метод позволяет получить наглядную форму получаемого сигнала, достаточно удобную для анализа свойств атмосферного воздуха. Наконец, одним из

главных достоинств данной системы является возможность определения пространственного распределения газовых компонентов атмосферы.

В качестве одного из недостатков этого метода можно выделить сложность, как в обработке экспериментальных данных, так и в интерпретации полученного сигнала. Трактовка приобретённых в ходе измерений графических сведений зависит от степени замутнённости атмосферы.

При этом можно утверждать, что метод лидарного зондирования атмосферы является одним из самых технологичных и перспективных методов изучения физических свойств атмосферы. Он обладает высокой точностью, но при этом чувствителен к величине фоновой засветки, что будет показано позднее.

Исследования атмосферы с помощью лидарного зондирования – один из самых технологичных и точных способов получения информации о многих физических и метеорологических параметрах атмосферы. В рассматриваемой работе таким параметром является коэффициент ослабления и, как следствие, концентрация загрязняющих аэрозолей. Именно эти аэрозоли оказывают огромное влияние на климатические процессы, которые на данный момент особо важны, такие, как глобальное потепление. Вследствие способности поглощать и переизлучать солнечный свет, аэрозоли оказывают на климат Земли даже большее влияние, нежели парниковые газы. Именно ролью аэрозольных частиц в таких глобальных процессах и обуславливается актуальность этой работы. Также, следует отметить, что, вследствие технологичности лидарных приборов, стоит ожидать технического улучшения и увеличения возможностей такого типа приборов и, соответственно, актуализации данной тематики в целом.

Цель работы заключается в исследовании влияния фоновой засветки на результаты лидарных измерений на примере обработки полученных экспериментальных данных.

Задача заключается в получении результатов вычисления коэффициента ослабления с учётом солнечного излучения, а также оценка и анализ погрешности полученных результатов.

Атмосфера Земли

Атмосфера – воздушная оболочка, состоящая из ряда газов и взвешенных в ней частиц примесей – аэрозолей. Масса атмосферы Земли составляет $5,157 \cdot 10^{15}$ т. Высота, принимаемая за условную границу атмосферы и околоземным космическим пространством, называется линией Кармана. Она составляет около 100 км над уровнем моря по данным международной авиационной федерации.

Безусловно, в атмосфере происходит множество физических и химических процессов, нехарактерных для других оболочек Земли. Для описания этих процессов используются, в основном, такие параметры, как температура, давление, влажность, скорость и направление ветра, величины, описывающие солнечное излучение.

Также, необходимо отметить, что атмосфера оказывает значительное влияние на человека и живые организмы, которое обуславливается уже вышеупомянутыми атмосферными физическими явлениями, а также химическим составом атмосферного воздуха. Наряду с другими компонентами, в состав воздушной оболочки Земли входят аэрозоли – суспензированные мелкие твёрдые или жидкие частицы в газовой среде. Происхождение данных частиц может быть как антропогенным, так и естественным. В первом случае аэрозоль зачастую может оказать неблагоприятное воздействие на здоровье человека и других организмов вследствие неприспособленности живых существ к воздействию веществ, не встречающихся в природе.

В заключение данной главы, считаю необходимым отметить, что изучение атмосферы включает в себя разделы нескольких различных направлений, таких как экология, физика атмосферы, физика космических лучей, метеорология. Очевидно, что изучать воздушную оболочку Земли необходимо с различных сторон.

Строение атмосферы

Атмосфера по своему составу, физическим и химическим свойствам неоднородна как по высоте, так и в пределах одной высоты, хотя в этом случае неоднородность зачастую не учитывается ввиду малого градиента физических величин. Также, газовая оболочка характеризуется высокой динамичностью. Рассмотрим общеупотребимую структуру атмосферы.

Тропосфера – самый нижний и наиболее плотный слой атмосферы. Именно данный слой оказывает наиболее непосредственное влияние на человека, так как в этой части воздушной оболочки Земли в основном находится место обитания живых организмов. Верхняя граница тропосферы располагается высоте 8—10 км в полярных, 10—12 км в умеренных и 16—18 км в тропических широтах; в зимнее время ниже, чем летом. Как уже было сказано, данный слой – наиболее плотный, он содержит >80 % всей массы атмосферного воздуха и примерно 90 % всего имеющегося в атмосфере водяного пара. В этой части атмосферы образуются облака, а также различные барические образования, а именно циклоны и антициклоны, активно происходят процессы конвективного и турбулентного обмена. В пределах данного слоя температура убывает с высотой за исключением приземного слоя (область атмосферы от поверхности Земли до высоты нескольких десятков метров), в котором возможна инверсия. Скорость этого изменения различается в зависимости от времени суток и года, а также географической широты и в среднем составляет $0,65^{\circ}/100$ метров.

Слой тропосферы сверху граничит с тропопаузой, переходной областью атмосферы с неизменной температурой с возрастанием высоты. Зачастую, при подъёме выше уровня тропосферы увеличивается скорость ветра в среднем на 2-3 км/ч. Высота тропопаузы сильно различается в зависимости от географической широты, а также от времени года и составляет от 10 до 18 км. Одним из важнейших процессов, которые необходимо учитывать при анализе тропопаузы – струйные течения.

Стратосфера – это слой атмосферы, расположенный на высоте от 8-11 км (зависит от широты) до 50 км. Это одна из наименее плотных областей атмосферы, в составе воздуха в этом слое почти отсутствует водяной пар. Также, в данном слое давление воздуха в несколько десятков раз меньше, чем вблизи поверхности Земли.

Для стратосферы характерно увеличение температуры с высотой с градиентом около $-0,28^{\circ}/100$ м. Данная величина также может варьироваться в зависимости от географической широты и времени года, но всегда имеет малое значение.

Следствием почти полного отсутствия водяного пара в стратосфере является почти полное отсутствие облачности. Зачастую присутствуют только тонкие перламутровые облака, также возможно образование различных форм перистых облаков.

Важнейшей особенностью стратосферы является повышенное содержание озона O_3 . Нагрев атмосферного воздуха происходит за счёт поглощения данным газом ультрафиолетового излучения. Именно в результате воздействия этих лучей на кислород в стратосфере и наблюдается увеличение содержания озона по сравнению с другими слоями атмосферы.

Всего в стратосфере помещается 90% от общего содержания озона атмосферы Земли. В этой части и находится озоновый слой, защищающий поверхность планеты от излишней интенсивности ультрафиолета. На высоте 15-50 км данный газ выполняет исключительно защитную роль, но в непосредственной близости от человека может оказать неблагоприятное воздействие на организм человека, увеличивая риск сердечно-сосудистых заболеваний и болезней дыхательных путей. Также, при реакции с холестерином, образует нерастворимые соединения, что приводит к развитию атеросклероза. Притом, это вещество обладает взрывоопасными свойствами.

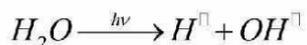
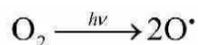
Выше слоя стратосферы расположена стратопауза. В данном слое температура достигает максимума после увеличения в стратосфере – около $0^{\circ}C$ и не изменяется при подъёме в пределах данного атмосферного пласта. Стратопауза располагается на высоте 50-55 км. Факторы, обуславливающие этот параметр, идентичны с высотой других слоёв.

Стратопауза, как и тропопауза, характерна не только для земной атмосферы, но и некоторых других планет.

Дальнейший подъём в атмосфере Земли приведёт к слою, называемому мезосферой. Данный слой расположен на высоте от 50–55 км до 85–100 км над уровнем моря и характеризуется уменьшением температуры до -70 – $-80^{\circ}C$, а в некоторых случаях – до -130° – $-140^{\circ}C$ на верхней границе области. Годовое изменение температуры в этом слое противоположно тому, которое наблюдается на поверхности. Это наиболее холодная часть атмосферы. Давление здесь в несколько тысяч раз меньше, чем на поверхности Земли. Также, здесь стораёт большинство метеоров, падающих на Землю.

В мезосфере с высотой уменьшается количество водяного пара и озона в дневное время, в ночной период наблюдается локальный максимум. Также, этому слою присуще уменьшение концентрации углекислого газа вследствие молекулярной диффузии и фотодиссоциации. Уравнения химических

реакций, описывающих последний процесс, будут аналогичны следующим



выражениям: $\text{OH}^\bullet \xrightarrow{h\nu} \text{H}^\bullet + \text{O}^\bullet$.

При всех изменениях в химическом составе, увеличивается количество атомарного кислорода и водорода, а также гидроксила в верхней части мезосферы вследствие всё того же процесса фотодиссоциации. В данной части атмосферы увеличивается количество ионов в целом, поэтому мезосферу принято относить к части ионосферы – сильно ионизированного по причине интенсивного космического излучения слоя атмосферы планеты.

Несмотря на крайне малое содержание водяного пара в этой части воздушной оболочки, в ней образуются серебристые и полярные мезосферные облака. Эти облака располагаются на самой большой высоте.

Циркуляция воздушных масс в этом слое обусловлены взаимодействием потоков воздуха с планетарными и различными гравитационными волнами. Вследствие данного процесса, в мезосфере возникает меридианальная циркуляция воздушных масс, восходящая ветвь которой располагается над полюсом Земли с летним временем года, а нисходящая – с зимним.

При этом мезосфера – одна из наиболее малоисследованных частей атмосферы Земли вследствие факта сильной разреженности воздуха для летательных аппаратов и слишком большой плотности для полёта искусственных спутников.

Аналогично другим слоям, выше мезосферы следует мезопауза. В данной области находится температурный минимум, который составляет -100°С и ниже в зависимости от времени года и суток, а также от географической широты. Мезопауза согласуется с нижней границей области активного поглощения рентгеновского и наиболее коротковолнового ультрафиолетового солнечного излучения. Также, на этой высоте возможно образование серебристых облаков.

Как и остальные промежуточные слои, мезопауза характерна не только для Земли, но и для других планет с атмосферой.

При дальнейшем подъёме на высотах 85–100 км до 500–800 км расположен слой термосферы. Данная часть атмосферы чрезвычайно разрежена, на эту область приходится порядка 0,1% -0,3% массы всей воздушной оболочки, средняя плотность воздуха составляет всего $1,8 \cdot 10^{-12}$ г/см³.

Термической особенностью данного слоя является резкое возрастание температуры воздуха с высотой до 1500°С в слое 90-200 км, а в отдельно взятые периоды – до 3000°С, например, во время полярных сияний. Такие высокие значения температуры обусловлены прямым воздействием солнечного излучения. Также, необходимо отметить, что в периоды низкой солнечной активности происходит существенное уменьшение толщины слоя.

В составе воздуха в термосфере преобладают азот и кислород, который имеется в атомарном виде. Также, присутствует аргон и другие газы. Как уже было сказано, их концентрация намного ниже, чем в нижних слоях атмосферы. Для данного слоя характерна сильная ионизация.

Из-за сильной разреженности воздуха в этой области практически отсутствуют сила трения и теплообмен с окружающей средой. Вследствие этого, в этом слое возможны полёты искусственных спутников Земли, но на высотах более 150 км. Ещё одним следствием разреженности этой части газовой оболочки является невозможность передачи звука.

Несмотря на относительную стабильность, этот слой очень чувствителен к изменению интенсивности солнечной активности, вследствие этого во многих параметрах и характеристиках здесь могут наблюдаться заметные осцилляции.

Далее при подъёме расположен слой термопаузы. Он не имеет постоянных границ, ведь высота, до которой значение температуры остаётся неизменной с увеличением высоты, сильно разнится. К тому же, степень нагретости воздуха внутри этого слоя абсолютно не стабильна вследствие солнечной активности, постоянство этого параметра обозначает лишь отсутствие выше значимых источников тепла за исключением Солнца. Приблизительно, высота термосферы может определяться диапазоном от 400 до 800 км.

Из-за воздействия солнечного излучения в данной области образуются радиационные пояса. В слое наблюдается сильная разреженность воздуха. Полёты в этой части атмосферы не совершаются.

Последним слоем атмосферы является экзосфера – область атмосферы, из которой происходит диссипация (утечка) газа в космическое межпланетное пространство. Здесь сила тяготения Земли ещё удерживает молекулы газа, но при этом в очень разреженном состоянии. Концентрация всех частиц воздуха составляет порядка 10^7 см^{-3} . В отличие от предыдущих слоёв, где частицы газа представляли собой гомогенную перемешанную смесь, в этой области они распределяются по высоте согласно значению молекулярных масс. В верхней части экзосферы возрастает процент атомарного и ионизированного водорода и гелия, в нижней – O и N. Эти частицы быстрее всего покидают планету. При этом вещество в экзосфере полностью ионизировано и находится в состоянии плазмы.

В этом слое наблюдается очень медленный рост температуры с высотой, весьма условный из-за сильных флуктуаций. Температура частиц газа из-за высокой скорости находится в диапазоне $1500\text{-}3000^\circ\text{C}$. Из-за крайне сильной разреженности, теплообмен в этой части газовой оболочки отсутствует.

Особенно интересен вопрос о границах экзосферы. Её нижняя граница расположена на высоте $500\text{-}1000$ км в различные периоды активности солнечного излучения.

Если определять верхнюю границу экзосферы как высоту, где давление солнечного излучения действует на атомы водорода с большей силой, чем притяжение нашей планеты, то её верхняя граница составит 190000 км.

Существует также более протяжённая экзосфера Земли, которая определяется присутствием диссипирующих атомов водорода, как бы ни была мала их концентрация. При таком рассмотрении верхняя граница экзосферы составляет 630 тыс. - 640 тыс. км. Такую «продлённую» экзосферу называют геокороной.

Экзосфера характерна не только для Земли, а для любой планеты, имеющей атмосферу.

Состав атмосферы.

Атмосфера, как это было замечено выше, имеет неоднородности по вертикали и горизонтали. Но эти неоднородности выражаются не только в изменчивости физических характеристик, таких как температура.

В прошлой главе была затронута тема различия химического состава воздушной оболочки Земли в различных её областях. Здесь данный вопрос будет рассмотрен подробно.

Именно химический состав является наиболее важным в данном исследовании, так как с помощью лидарных измерений будет измерено количество аэрозольных примесей в воздухе. К тому же, данный фактор влияет не только на экологическую, но и климатическую изменчивость.

На относительно небольших высотах, а именно до высоты около 100 км, атмосфера представляет собой гомогенную хорошо перемешанную почти однородную смесь газов. Средняя молекулярная масса в этой области равна около 29. При дальнейшем подъёме распределение газов по высоте происходит согласно величине M_r . Концентрация более тяжёлых газов стремительно убывает при удалении от поверхности Земли. Вследствие этого, на больших высотах атмосфера становится более разреженной.

Наиболее важной для изучения с точки зрения химического состава является та часть газовой оболочки, которая наиболее сильно воздействует на человека. Таким слоем можно считать нижнюю часть тропосферы, которую также называют приземным слоем и расположенную на высотах 50-100 м.

Безусловно, как приземный слой, так и остальные части атмосферы имеют в своём составе те компоненты (газы), концентрация которых практически неизменна со временем. Также, присутствуют и газы с переменной концентрацией.

Наиболее важные газы, имеющие постоянную концентрацию, - это азот, кислород и аргон. Их количественная составляющая в атмосферном воздухе будет приведена ниже. Эти газы составляют более 99% всей массы атмосферы. Также, можно считать неизменной насыщенность такими компонентами, как аргон (*Ar*), гелий (*He*), неон (*Ne*), криптон (*Kr*), ксенон (*Xe*), радон (*Rn*).

Основные газы, входящие в состав атмосферного воздуха и имеющие переменную концентрацию – это озон, закись азота, оксид углерода, двуокись углерода, метан. Также, к ним можно отнести пыль в состоянии аэрозоли, различные примеси, дым, водяной пар, кристаллы льда и морской соли, продукты радиоактивного распада.

Также, на больших высотах, в состав атмосферы входят различные газы в молекулярном (в основном, O и N) и ионизированном состоянии,

гидроксид и оксид хлора. Такие компоненты, в основном, возникают в результате реакции фотодиссоциации.

Концентрации основных газовых компонент в атмосфере наиболее удобно и наглядно представить в виде следующей таблицы:

Таблица 1 – химический состав атмосферного воздуха

Компонент	Содержание, % мас.	Компонент	Содержание, % об.
N₂	75,5	Rn	6·10⁻⁵
O₂	23,10	H₂	7,6·10⁻⁵
Ar	1,29	CO	10⁻⁴ – 10⁻⁶
CO₂	0,046	O₃	10⁻⁵ – 10⁻⁶
Ne	1,3·10⁻³	N₂O	5·10⁻⁵
He	7,2·10⁻⁵	Xe	8,7·10⁻⁶
CH₄	1,7·10⁻⁴(об.)	NH₃	2,6·10⁻⁶
Kr	2,9·10⁻⁴	NO₂	2,8·10⁻⁶ – 5·10⁻⁸

H₂O₂ имеет концентрацию 4·10⁻⁸.

Особую роль в составе атмосферы играют парниковые газы. Вследствие высокой прозрачности в видимом диапазоне и высокого поглощения в СИК и ДИК, эти газы вызывают парниковый эффект. Такой эффект заключается в увеличении температуры нижних слоёв атмосферы в сопоставлении с температурой теплового излучения Земли.

К таким газам относятся водяной пар, углекислый газ, метан, озон, оксиды азота, а также фреоны.

Водяной пар играет наиболее важную роль в образовании облаков, выпадении осадков, теплообмене и изменении климатических условий. При этом, несмотря на малую долю содержания в атмосферном воздухе, концентрация паров воды очень изменчива в пространстве и во времени. Также, наблюдается быстрая смена агрегатного состояния воды.

Механизм парникового эффекта, связанного с водяным паром, основан на способности этого газа удерживать длинноволновое тепловое излучение поверхности.

Один из газов, подверженных наибольшему влиянию антропогенного фактора, является углекислый газ. Известно, что вследствие увеличения транспортного потока и объёмов промышленности концентрация CO_2 заметно увеличивается и составляет в современной атмосфере в среднем около 0,0314%. Для сравнения, в доиндустриальную эпоху эта величина составляла приблизительно 0,03%. Но при этом существуют и естественные источники углекислого газа, такие как вулканы, лесные пожары, горячие источники, гейзеры, карбонатные горные породы.

Углекислый газ сыграл важнейшую роль не только в атмосфере. Эта компонента является главным источником углерода для жизни на планете. Безусловно, содержание данного газа является важным климатообразующим фактором, хотя данное влияние весьма неоднозначно и обусловлено свойством CO_2 поглощать и переизлучать инфракрасное излучение на таких длинах волн, как 4,26 мкм и 14,99 мкм. Также, его роль в развитии жизни на Земле заключается в участии в процессе фотосинтеза.

В отличие от многих других парниковых газов, его концентрация практически постоянна в атмосфере.

Озон – парниковый газ, который становится и становился объектом многих научных исследований. Конечно, его содержание весьма существенно влияет на климат.

Образование озона происходит за счёт воздействия ультрафиолета на молекулярный кислород. Во время этого процесса происходит поглощение наиболее жёсткой части (ближней) УФ излучения. Этой реакцией и обуславливается климатическая роль O_3 .

Этот газ в значительной мере агрессивен, что подтверждается реакцией окисления йодида калия, а также ртути и серебра.

Необходимо отметить, что концентрация озона увеличивается с удалением от поверхности Земли. Максимум концентрации O_3 приходится на высоту 20–25 км. Эта область называется озоновым слоем. Этот слой защищает поверхность нашей планеты от вредного воздействия ультрафиолетового излучения. Очень часто объектом изучения становятся так называемые озоновые дыры – места на планете, над которыми наблюдается наименьшая концентрация озона. Уменьшение содержания этого газа может происходить по таким причинам, как воздействие фреонов, пыли, извержения вулканов, воздействие солнечной радиации.

Несмотря на важнейшую роль в сохранении и поддержании жизни на Земле, озон в больших концентрациях весьма токсичен и может вызвать изменения в легких, раздражение слизистых оболочек глаз и носа, головную боль, головокружение, снижение кровяного давления.

Загрязнение атмосферы

Одной из глобальных проблем всего человечества является загрязнение атмосферного воздуха Земли. Вследствие данного процесса происходит увеличение случаев отравления и болезней среди жителей промышленных городов, ухудшение качества среды обитания птиц, изменение химического состава атмосферных осадков, ухудшение экологической ситуации в целом.

Загрязнение атмосферы можно определить как изменение химического состава атмосферного воздуха, в результате которого происходит увеличение концентрации некоторых веществ, которое может повлечь за собой негативные последствия для здоровья человека и естественного развития окружающей среды. Безопасность концентрации вещества, содержащегося в атмосферном воздухе, определяется такими величинами, как ПДК (предельно допустимая концентрация).

Одну из важнейших ролей в загрязнении атмосферы играет содержание в воздухе аэрозолей. Измерению этой концентрации и его влиянию посвящена настоящая работа. Такие вычисления будут представлены конкретным примером.

Аэрозоли

Аэрозоль – это взвешенные мелкие частицы пыли, капли жидкости, которые являются загрязнителями атмосферы и представляют собой коллоидную систему.

Основными источниками аэрозолей являются природные факторы, такие, как вулканическая активность, смерчи, песчаные и пыльные бури, эрозия почв, пожары, космические тела и пыль, жизнедеятельность некоторых растений, морская поверхность. Такие частицы называют естественными аэрозолями.

Искусственные аэрозоли – частицы, возникшие непосредственно при участии деятельности человека. Источники таких аэрозолей – транспорт,

промышленные объекты (перерабатывающие и металлургические заводы), ТЭС, другие объекты энергетики.

В общем случае, концентрация естественных аэрозолей в атмосфере превышает аналогичный параметр для искусственных аэрозолей. В случае отсутствия в изучаемой местности большого количества промышленных и иных объектов, имеющих вредные выбросы в атмосферу, соотношение содержания естественных и антропогенных аэрозолей составляет 80% и 20%.

Аэрозоли от различных источников могут иметь различный химический состав и химические свойства, а также оказывать различное воздействие на атмосферу и окружающую среду, что будет показано ниже.

Одной из характеристик частиц аэрозоли является дисперсность – величина, показывающая максимальное количество частиц в 1 кубическом метре. Очевидно, при уменьшении размера частицы увеличивается дисперсность.

Диапазон размеров аэрозольных частиц составляет от приблизительно 1 нм (кластеры) до нескольких десятков микрон, а в отдельных случаях – и до 100 мкм (крупные частицы пыли). По данному признаку все аэрозоли можно разделить на три категории:

1. мелкодисперсные ($r \sim 0,1$ мкм),
2. среднедисперсные ($0,1 \text{ мкм} < r < 1 \text{ мкм}$)
3. грубодисперсные ($r \sim 1$ мкм).

Крупные частицы аэрозоли составляют малую часть вследствие того, что они быстро осаждаются. Порядка 95% всех капель и частиц пыли имеют радиус $\sim 0,01$ мкм.

Верхней границей размера частицы аэрозоля можно считать радиус условной частицы, которая имеет возможность передвигаться в основном с газовой средой. Эта характеристика определяется также формой частицы и скоростью турбулентного перемешивания.

Нижняя граница аэрозоли определяется содержанием около 10 молекул и неспособностью отражаться от твёрдой поверхности при ударе.

Необходимо выделить особое свойство некоторых аэрозольных частиц.

Гигроскопичность – это свойство, описывающее способность различных веществ адсорбировать влагу из воздуха.

В связи с этим понятием, некоторая доля мелкодисперсной категории, которая обладает свойством гигроскопичности, называется ядрами конденсации. Именно за счёт таких частиц происходит переход водяного пара в водяные капли.

Также, аэрозоли обладают свойством гетерогенности – неоднородностей в структуре. Это означает, что любой объём аэрозольных частиц содержит в себе различные по физическим свойствам аэрозоли. Данное свойство указывает на наличие поверхностного слоя или межфазной поверхности.

Атмосфера с содержащимися в ней частицами аэрозоли представляет собой дисперсную систему, то есть образование из двух гетерогенных частей, химически не взаимодействующих друг с другом. Данная структура определяет оптические свойства атмосферного воздуха, такие, как рассеивание и поглощение теплового излучения, а также искривление его направления. В результате имеем влияние концентрации аэрозоли на климатические условия. Вследствие неравномерности распределения частиц во времени и пространстве, данное влияние тоже разнится.

Концентрация аэрозолей связана с высотой над поверхностью Земли обратной зависимостью: чем больше высота, тем меньше содержание аэрозоли. Атмосферные аэрозоли наблюдаются в основном до высоты стратосферы. Максимум концентрации частиц приходится на высоту 20 км. Слой аэрозольных частиц, расположенных на данной высоте, называется слоем Юнге или двадцатикилометровым аэрозольным слоем. В стратосфере в целом аэрозоли имеют свойство переноса радиации, которое, во многом, определяет радиационный баланс нашей планеты и обуславливает прямое влияние таких частиц на климат. Другое влияние аэрозолей на климат обуславливается воздействием аэрозольных частиц на фазовые переходы капель воды в атмосфере при образовании облаков и осадков. Наконец, аэрозоли играют важную роль в гетерогенных химических и фотохимических процессах, что также приводит к динамике в радиационном режиме Земли. Также, необходимо отметить, что аэрозольные частицы участвуют в двух основных процессах в атмосфере: осаждении и коагуляции.

Аэрозоли возникают в результате двух процессов: дезинтеграции и конденсации. Эти процессы различаются между собой способом

взаимодействия первичных частиц: при дезинтеграции происходит разрушение наиболее крупных из них, а при конденсации наблюдается рост за счёт соединения мелких.

Обычно частицы, которые образуются в результате дезинтеграции, крупнее. Аэрозоли, полученные в результате первого процесса, имеют радиус 0,1 мкм до 100 мкм, в результате второго - 0,001 мкм до 10 мкм.

При увеличении размера аэрозольных частиц происходит уменьшение содержания этих частиц в 1 кубическом сантиметре чистого воздуха. Данная зависимость наблюдается вследствие нестабильности частиц с радиусом более 20 мкм.

Для получения информации о концентрации аэрозольных частиц и их размерах необходимо построение спектров распределения данных частиц по их радиусам.

Химический состав аэрозольных частиц, в основном, обуславливается их генезисом. К примеру, пыль имеет в своём составе различные оксиды железа (Fe_2O_3 , FeO , Fe_3O_4) и марганца (MnO , Mn_3O_4 , Mn_5O_8). При образовании пыли, вероятно, происходит избирательное действие физического и химического разделения, но этот процесс плохо изучен. При этом стоит отметить, что состав пыли практически неизменен в любой местности.

При происхождении аэрозолей из песка их состав определяется содержанием диоксида кремния (SiO_2), различных токсичных металлов, а также некоторых органических веществ, таких как пестициды. Сложно оценить вклад песка в количество аэрозолей в атмосфере, но количество частиц, имеющих почвенное происхождение, примерно 50% по массе.

Частицы аэрозолей, имеющих космическое происхождение, зачастую имеют в своём составе различные соединения магния, железа, никеля, кремния силикаты и графит. В нижней части стратосферы доля таких аэрозолей – около 10%. Этот показатель растёт с увеличением высоты.

Главным источником искусственных аэрозолей являются различные продукты горения, а также сульфаты. В качестве таковых могут выступать CO_2 , водяной пар и другие. Также, возможно содержание некоторых радиоактивных элементов, а именно ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{58}Co , ^{59}Fe , ^{60}Co , ^{65}Zn , ^{95}Zr , $^{110\text{m}}\text{Ag}$. Но, как было сказано выше, доля таких аэрозольных частиц в обычных условиях не превышает 20%.

Вклад различных промышленных объектов в содержание в атмосферном воздухе различен. Ниже приведена таблица выбросов пыли от разных источников.

Производственный процесс	Выброс пыли, млн.т/год
Сжигание каменного угля	93,600
Выплавка чугуна	20,210
Выплавка меди (без очистки)	6,230
Выплавка цинка	0,180
Выплавка олова (без очистки)	0,004
Выплавка свинца	0,130
Производство цемента	53,370

Вредное воздействие на экологическую ситуацию от аэрозолей усиливается при усилении турбулентного обмена, наличии тумана, а также определённой скорости ветра, которая находится по формуле: $u_M = 0,65 * (V * \Delta T / H)^{1/3}$ (H – высота источника загрязнения, ΔT – разность температур, V – объём смеси загрязнителя), установленной эмпирическим путём. Именно при таких условиях наблюдается наибольшая приземная концентрация примесей.

При тумане наличие аэрозольных частиц приводит к ухудшению видимости вследствие содействия конденсации атмосферной влаги частицами примесей. В результате совокупности двух факторов, а именно наличия аэрозолей в атмосферном воздухе и тумана, образуется смог. При этом, смоги могут иметь различное происхождение.

Дымные смоги возникают при прямом первичном химическом взаимодействии аэрозолей, полученных в результате горения, с каплями воды, которые образуются при конденсации водяного пара. Такие смоги могут нанести серьёзный ущерб здоровью людей и экологической ситуации,

так как они содержат серную и сернистую кислоту, а также их производные, что может привести к выпадению «кислотных дождей».

Фотохимический смог возникает при взаимодействии между собой первичных и вторичных газов и аэрозольных частиц, образованных в результате фотохимических реакций. Данное явление распространено не так часто вследствие сложности условий, необходимых для его образования. Помимо высокой концентрации оксидов азота, углеводородов в атмосфере необходимо почти полное отсутствие ветра, интенсивное солнечное излучение, а также сильная и длительная инверсия.

Такой смог ещё более опасен для здоровья человека, так как в атмосфере образуются различные перекиси, наличие которых приводит в конечном итоге к образованию свободных радикалов, которые приводят к стимуляции воспалительных процессов, ускорению старения организма. Также такие вещества могут спровоцировать такие заболевания, как рак, атеросклероз, инфаркт миокарда, инсульт, ишемия, заболевания нервной и иммунной систем.

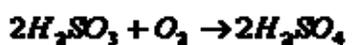
Механизм образования аэрозолей различной природы зачастую достаточно сложен. Рассмотрим в качестве примера процесс возникновения вулканических аэрозолей.

Как известно, при извержении вулкан выбрасывает в атмосферу частицы «вулканического пепла», который возникает при застывании капель расплавленной магмы под воздействием давления газов из кратера. Параллельно с этим процессом, при извержении образуется огромное количество газообразных веществ, которые после определённых химических превращений переходят в различные конденсирующие продукты, основу которых составляет диоксид серы (SO_2).

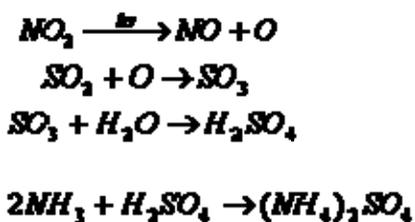
После этого происходит растворение диоксида серы в каплях воды с образованием серной кислоты согласно следующей реакции:



Также, происходит окисление SO_2 в SO_3 , после чего происходит гидратация данного вещества в серную кислоту. В такой реакции сухие частицы аэрозоля будут выступать в роли катализатора:



Таким образом, из сухих аэрозольных частиц возникают жидкие аэрозоли серной кислоты. Существует более сложный механизм образования таких аэрозолей, при котором происходит фотолиз диоксида азота в атмосфере, а также превращение H_2SO_4 в сульфат аммония под действием аммиака:



При извержении вулкана может образоваться порядка 10^9 тонн аэрозолей. При этом, крупные извержения вулканов происходят достаточно редко, следовательно, доля вулканических аэрозолей невелика в сравнении с почвенными или морскими аэрозольными частицами. Также, следует отметить, что при извержении вулканов частицы могут подниматься на высоту более 20 км при достаточно сильных извержениях.

Важнейшей характеристикой аэрозоли является время её нахождения в атмосфере. Этот параметр зависит от размера частиц, скорости ветра и турбулентного обмена, атмосферных осадков, плотности, дисперсности и расположения частиц по высоте, а также от химической активности вещества.

Самым очевидным фактором, влияющим на «время жизни» аэрозольных частиц является их размер. Ниже представлена таблица, показывающая связь этих параметров и связанных с ними величин вертикального и горизонтального переноса:

Радиус, мкм	Время жизни, день	Перенос, км	
		Горизонтальный	Вертикальный
0.001	0.01	8	0.02
0.01	1	800	2.0
0.1	10	8000	20.0
1.0	10	8000	20.0
10	1	800	2.0
100	0.01	8	0.02

Как видно из таблицы, размер неоднозначно влияет на время жизни частицы. Это происходит вследствие возможности транспортировки крупных по размеру частиц на большие расстояния при условии, что аэрозоль находится изначально на достаточной высоте. В таком случае аэрозольная частица не покинет атмосферу и может транспортироваться в течение нескольких суток. В связи с процессом переноса частиц введём понятие фоновой аэрозоли.

Фоновый аэрозоль – это аэрозоль, отделённый от источников его образования и находящийся от них на достаточном расстоянии. Фоновый аэрозоль включает в себя такие составляющие, как:

1. Континентальный аэрозоль
2. Морской аэрозоль
4. Природный фотохимический смог
5. Старый витающий аэрозоль

Некоторые сухие аэрозоли удаляются из атмосферы путём осаждения атмосферными осадками, а также влиянием туманов. Таких частиц около 20%. Для такого случая время пребывания рассчитано Юнге и составляет порядка недели, в зависимости от климатических условий.

Те частицы, которые движутся согласно законам, схожим с законами движения газообразных частиц, и имеют размеры порядка 1 мкм, крайне слабо подвержены осаждению. Такие аэрозольные частицы могут находиться в атмосфере до 10-20 суток и распространяться по всей планете равномерно. Более длительное время занимает переход таких аэрозолей из южного полушария в северное и наоборот. Это происходит вследствие воздействия низкого давления в экваториальной зоне.

Одним из факторов, определяющих пребывание аэрозольных частиц в атмосфере, являются восходящие воздушные потоки, которые позволяют аэрозолям подняться в стратосферу. Такое перемещение частиц возможно при условии, что аэрозоли касаются поверхностных слоёв тропосферы.

Как уже было отмечено, наличие аэрозолей в атмосфере заметно ухудшает видимость. Также, при образовании серной кислоты при реакции с водяным паром, может быть нанесён дополнительный ущерб в виде кислотных дождей и ускорения процесса коррозии металла. В связи с этим

происходит повреждение зданий и сооружений, а также технического оборудования.

Кроме того, некоторые токсичные аэрозоли могут вызывать наркотический эффект, провоцировать аллергическую реакцию, которая может привести к высыпаниям, астме, в особо тяжёлых случаях – к летальному исходу.

Также, частицы пыли могут закупоривать поры потовых и сальных желёз, препятствуя тем самым выполнению их функций, вызывая различные кожные заболевания и язвы и нарушая терморегуляцию.

Аэрозоли, попавшие в глаза, вызывают раздражение слизистых оболочек глаза, что приводит к конъюнктивиту. Также, некоторые частицы, такие как песчинки, усиливают чувствительность глаза к солнечному свету (фотосенсибилизирующее воздействие).

Некоторые токсичные аэрозоли, проникая в организм человека через органы дыхания и пищеварения, могут вызвать серьёзное отравление (интоксикацию) организма, а также воспаление дыхательных и пищеварительных органов.

Исходя из вышеизложенных фактов, следует, что при отсутствии должного внимания к масштабам загрязнения атмосферы аэрозолями, к мониторингу атмосферных выбросов различными предприятиями и другими объектами, а также транспортом, возможны серьёзные проблемы не только экологического, но и медицинского характера.

Зондирование атмосферы с помощью лазерных устройств

Начало лидарного зондирования было положено после измерения в 1905 году В.В. Кузнецовым высоты облаков с помощью прожектора в ночное время. В результате знаний о рассеивании света облаками и простых математических вычислений, учёный смог определить высоту той облачности, которая наиболее интенсивно отражала лучи прожектора.

Впоследствии, прожекторное зондирование развилось в лазерное. Одно из главных достоинств такого метода состоит в его дистанционности. При такой методике имеется возможность определить любую характеристику

воздушной среды в любом направлении лазерного луча. Также, необходимо отметить высокое пространственно-временное разрешение, возникающее вследствие коротких импульсов и высокой частотой их повторения. При этом стоит отметить важнейшее свойство излучения, а именно когерентность и монохроматичность, т.е. практически все фотоны имеют одинаковую длину волны. Именно это свойство даёт ощутимые преимущества и новые возможности по сравнению с прожекторным зондированием.

Такие системы выдают массив данных с пространственно-временным разрешением по характеристикам, влияющим на погоду, и по характеристикам загрязнителя в глобальном и локальном масштабе. При таких условиях будет наблюдаться достаточно высокая точность измерений концентрации загрязнителя и различных метеорологических параметров. Также, следует отметить, что любой комплекс оборудования для лазерного зондирования должен удовлетворять условиям Интернациональной геосферно-биосферной программы (МГБП) и программы массовых конфигураций атмосферного климата.

Существуют различные методы лазерного зондирования атмосферы. Каждый метод основан на том или ином процессе, связывающем лазерное излучение и атмосферные компоненты.

В простых лазерных установках, таких, как лазер на рубине с длиной волны излучения 694,3 нм, длительность импульса составляла 30 нс. Это означает, что из лазера в атмосферу поступала порция фотонов с интервалом во времени между первым и последним в 30 наносекунд. В связи с этим введём некоторые понятия.

Пространственная протяжённость зонда – это поверхность, которая ограничивает собою расстояние от первого фотона до последнего. В вышеописанном случае, эта величина составляет $L=c*t=9$ м, где c – скорость света, t – длительность импульса.

Половина этой величины имеет название локационной протяжённости импульса. В данном случае эта величина составляет 4,5 метра.

Вследствие такой протяжённости импульса имеется высокое пространственное разрешение и появляется возможность исследования тонкой структуры облака и других характеристик атмосферы.

При столкновении частицы аэрозоля с фотоном, возможно протекание различных процессов. Самые основные из них – это поглощение фотона

молекулой с передачей энергии и рассеивание фотонов при взаимодействии, то есть изменение их направления движения. Также, возможно явление флуоресценции (способность поглощать энергию электромагнитного излучения и впоследствии испускать часть этой энергии в различных диапазонах длин волн) и различные нелинейные эффекты.

Если поглощение может происходить только газами или аэрозолями, то рассеивание может иметь различную природу. В уже описанном случае, когда молекула поглощает фотон, частица аэрозоли впоследствии произведёт испускание нескольких других фотонов. Такой процесс называется спонтанное комбинационное рассеивание.

Как отдельный случай, может наблюдаться равенство частоты энергетического перехода в атоме и частоты излучённого фотона. Такое рассеивание называется резонансным.

Также, одним из видов рассеивания, наблюдаемого при взаимодействии фотона и частиц аэрозоли, является молекулярное рассеивание, которое обусловлено флуктуациями плотности жидкости или газа. Вследствие хаотического движения молекул может произойти отклонение фотона от его первоначального направления движения.

При рассеивании фотоны меняют частоту. Вследствие различия скоростей движения у разных молекул и различного их направления при хаотическом движении после рассеивания наблюдается целый спектр частот и уширение линии излучения. Такой эффект называется эффектом Доплера для электромагнитных волн.

Так как аэрозоли испытывают направленное движение, будет наблюдаться доплеровский сдвиг частоты.

Все эти явления могут быть использованы для лазерного зондирования в атмосфере. Зачастую, такие эффекты рассматриваются независимо друг от друга для того, чтобы оценить влияние каждого из них отдельно. В таком случае получается наиболее подробная информация об исследуемом объекте.

Рассмотрим эти эффекты подробнее в следующих разделах. Заранее необходимо отметить, что все процессы описываются для частиц, близких по форме к сферической. Частицы другой формы могут быть описаны только в отдельных случаях.

Аэрозольное поглощение фотонов

При таком явлении важной характеристикой является фактор поглощения или сечение поглощения, которое показывает способность тех или иных молекул поглощать фотон с определённой длиной волны и поляризации.

Для описания рассеивания света в различных средах на сферических частицах создана теория Ми. Аналогично рассеиванию и согласно формализму этой теории, мы можем определить величину фактора поглощения. Она определяется выражением:

$$Q_{abs} = 4\pi k\rho \int_0^\pi \sin\theta d\theta \int_0^1 x^2 B(x, \theta, \phi = \frac{\pi}{4}) dx,$$

Здесь $B(r, \theta) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{|E_a(r, \theta, \phi)|^2}{E_i^2} d\phi$ - функция, описывающая источники электромагнитной энергии в объёме частицы (безразмерная величина), $x=r/R_p$ – радиальная координата частицы (безразмерная).

Для количественного описания процесса поглощения фотонов аэрозолями используется величина комплексного показателя преломления. Эта величина показывает фазовый сдвиг и уменьшение амплитуды излучения, которое претерпело взаимодействие с аэрозолем.

Данная величина определяется соотношением $m=n - i^*\chi$, где n и χ называют оптическими постоянными вещества частицы.

В данном случае, мнимая часть этого значения количественно описывает уменьшение амплитуды сигнала. При таком рассмотрении, величина χ называется показателем поглощения. Соответственно, величина n равна фазовый сдвиг волны и имеет название показатель преломления.

Величина комплексного показателя преломления зависит от длины волны, а также от температуры.

Для качественной характеристики поглощения оптического излучения необходимо проанализировать мнимую часть, а также ввести новый параметр.

В соответствии с теорией Ми, введём безразмерный параметр $\rho=2*\pi*r/\lambda$, где r – радиус молекулы, λ – длина волны излучения. В таком случае, можно утверждать, что при $\chi^*\rho < 0,1$ поглощение фотона частицей аэрозоли

достаточно невелико и не оказывает существенного влияния на коэффициент рассеивания. В таком случае полный коэффициент близок к χ . Также, поглощение фотонов продуктами конденсации водяного пара при диапазоне длин волн от 0,3 до 13 мкм будет оказывать значительное влияние только в условиях крупнокапельных туманов и облаков. В условиях различных дымок значение параметра ρ будет составлять <15 для коротковолнового диапазона и <1 для длинноволнового. Вклад поглощения будет зависеть от количества крупных частиц, имеющих полосы мощного молекулярного поглощения.

Для количественной характеристики изменения интенсивности излучения после поглощения вводится параметр коэффициент поглощения, показывающий отношение со знаком минус всего потока падающей и рассеянной энергии излучения через сферу большого радиуса вокруг частицы к интенсивности падающего потока $\sigma_{\text{п}}$, который измеряется в м^2 .

Аэрозольное рассеивание фотонов

Аэрозольное рассеивание фотонов – один из основных процессов в атмосфере, в результате которого изменяется пространственное распределение и поляризация излучения. В результате рассеивания, помимо изменения направления движения фотонов, происходит ослабление падающего излучения.

Количественно это ослабление описывается величиной объемного коэффициента аэрозольного ослабления света $\beta_s(\lambda, h)$. Этот параметр является функцией высоты и длины волны, а также от счётной концентрации частиц аэрозолей. Получение аналитического выражения, показывающего зависимость β_s от λ и h в значительной степени затруднительно.

Для количественной характеристики, используемой как при рассеивании, так и при поглощении, вводится параметр τ , называемый оптической толщиной. Оптическая толщина – это величина, характеризующая способность среды ослаблять падающее излучение при рассеивании и поглощении. В общем случае параметр связан с объёмным коэффициентом ослабления

соотношением: $\tau = \int_0^l \beta_s(h) dh$, где l – длина пути луча.

Аналогично, для описания изменения интенсивности излучения после процесса рассеивания используется коэффициент рассеивания, показывающий отношение всего потока рассеянного электромагнитного

излучения во всех направлениях к интенсивности падающего потока σ_p . Единицы измерения идентичны коэффициенту поглощения.

Как промежуточный итог, можно заметить, что процесс рассеивания зависит от как временного, так и пространственного изменения макроскопических частиц вещества в атмосфере.

Флуоресценция

Флуоресценция – это явление, в процессе которого происходит излучение фотона в результате воздействия на молекулу вещества электромагнитного излучения. Данный эффект наблюдается и на атмосферных аэрозолях. При этом частица аэрозоля поглощает фотон с одной частотой ν_{ij} , а впоследствии спонтанно испускает другой фотон с частотой ν_{jk} .

Аналогично, введём для данного процесса величину сечения флуоресценции – способность молекулы к излучению фотонов при воздействии на них электромагнитным излучением. Данная величина будет составлять

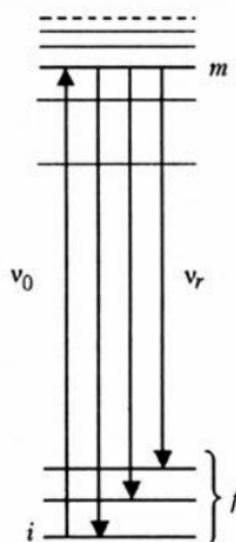
$\sigma_f(\lambda_{jk}, \lambda_{ij}) = Q_a(\lambda_{ij}) \eta_f(\lambda_{jk}, \lambda_{ij})$, где Q_a – сечение поглощения, $\eta_f(\lambda_{jk}, \lambda_{ij})$ – квантовая эффективность, в общем случае величина, характеризующая светочувствительность различных приборов и материалов. Зависит от коэффициента тушения (безразмерный параметр, характеризующий соотношение излучательных и столкновительных переходов, определяемый по формуле Штерна – Фольмера), а также спектральной формы линии флуоресценции. Ниже представлена таблица значений сечения флуоресценции в зависимости от различных значений коэффициента тушения и для различных веществ. В данном случае, рассматривается величина сечения в единице телесного угла стерадиане:

Молекула	Длина волны возбуждающего излучения, нм	Q^F	$\sigma^A(\lambda_I)$, см^2	$d\sigma^F(\lambda_I)/d\Omega$, $\text{см}^2 \cdot \text{ср}^{-1}$
SO ₂	290	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$3,5 \cdot 10^{-19}$	$3,3 \cdot 10^{-26}$
NO ₂	300,1	$4,9 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-19} *$	$2,0 \cdot 10^{-24}$
	400	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$2,8 \cdot 10^{-19}$	$5,6 \cdot 10^{-25}$
	435,8	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-19}$	$7,2 \cdot 10^{-25}$
I ₂	589,5	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$4,6 \cdot 10^{-18}$	$6,1 \cdot 10^{-22}$
NO	226,5	$\approx 3 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-18}$	$3 \cdot 10^{-22}$
OH	282,6	$10^{-2} \dots 10^{-3}$	$1,20 \cdot 10^{-17}$	$10^{-20} \dots 10^{-21}$

Как можно видеть из таблицы, вероятность такого явления невелика при малых значениях телесного угла.

В случае простых структур молекул и отдельных атомов спектр излучения при флуоресценции дискретен. При этом частоты переизлученных фотонов не больше частот поглощённых фотонов. При таких условиях флуоресценцию называют резонансной. В верхних слоях атмосферы, а именно в мезосфере и термосфере, такому явлению становятся присущи особенности резонансного рассеяния.

На диаграмме схематично показаны энергетические уровни молекулы при резонансной флуоресценции:



При более сложных молекулах наблюдается практически непрерывный спектр вследствие перераспределения возбуждённого состояния посредством переходов без излучения и, как результат, широкополосной флуоресценции.

Также необходимо отметить, что параллельно флуоресценции наблюдается другое явление, именуемое люминесценцией. Его природа заключается в продолжительном свечении вещества после поглощения энергии возбуждения. Данное излучение имеет нетепловой характер и продолжается намного дольше времени периода световых колебаний. Такое понятие применимо только к термодинамической системе, состоящей из атомов или молекул, находящихся в близком состоянии к равновесному. Данный эффект является фоновым и уменьшает количество полезной информации о резонансной флуоресценции при измерениях в тропосфере.

Спонтанное комбинационное рассеивание

Вообще, комбинационное рассеивание – изменение первоначального движения фотонов с последующим их ослаблением, происходящее по неупругим законам на молекулах вещества, при котором происходит существенное изменение частоты излучения. Это явление также называется эффектом Рамана.

При наблюдении возникают новые линии в спектре рассеивания. Они являются комбинацией частот падающего излучения и частот колебания атомных ядер относительно своего положения равновесия и движения молекулы.

Спонтанное комбинационное рассеивание подразумевает под собой возможность испускания фотонов в любом направлении и суммарная интенсивность рассеянного излучения намного меньше интенсивности падающего излучения, а именно в 10^5 - 10^6 раз.

При искусственном воздействии излучения высокой интенсивности на среду рассеивания происходит экспоненциальное увеличение интенсивности рассеянного излучения. В таком случае интенсивности падающей и рассеянной волны близки по своим значениям. Такое явление получило название вынужденного комбинационного рассеивания.

Для объяснения этого эффекта используются как классические, так и квантовые представления.

Если рассматривать спонтанное комбинационное рассеивание с точки зрения классической теории, то мы получим несколько упрощённую картину данного явления. Согласно таким представлениям, световая волна обладает собственным электрическим полем, которое индуцирует систему зарядов, обладающих асимметрией в расположении положительных и отрицательных компонентов системы, иначе говоря, дипольный момент молекулы. Этот дипольный момент имеет частоту колебаний, совпадающую с частотой колебаний падающего света. При изменении колебания частоты дипольного момента происходит испускание фотона во всех направлениях с соответствующим частотным спектром. Как уже было отмечено, при малых интенсивностях падающей волны процесс происходит по линейному закону, а при достаточно большой интенсивности – по экспоненциальному.

Перед описанием данного процесса при помощи квантовых представлений введём некоторые новые определения.

Для расчёта дипольного момента применяется формула:

$$\vec{P} = \alpha \vec{E}_0 \cos(2\pi\nu_0 t)$$
, где E_0 – амплитуда напряжённости электромагнитного поля световой волны, α – поляризуемость молекулы, t – время, ν_0 – частота колебаний. Как известно, напряжённость поля меняется по гармоническому закону.

Для простоты не будем учитывать зависимость поляризуемости молекулы от частоты. Такое допущение возможно в случае, если исходное излучение поляризовано, направления дипольного момента и напряжённости совпадают. Если разложить величину α по смещению ядра в ряд Тейлора, взяв первый член разложения, после чего подставить выражение для α в формулу дипольного момента, мы получим выражение: $\vec{P} = \alpha \vec{E}_0 \cos(2\pi\nu_0 t) =$

$$= \alpha_0 \vec{E}_0 \cos(2\pi\nu_0 t) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \alpha}{\partial q} \right)_0 q_0 \vec{E}_0 \left\{ \cos [2\pi (\nu_0 + \nu_1) t] + \cos [2\pi (\nu_0 - \nu_1) t] \right\}$$

, где q_0 – величина начального смещения молекулы. В данной формуле величину $\cos(2\pi(\nu_0 + \nu_1)t)$ называют антистоксовой компонентой, она обозначает испущенный молекулой фотон, имеющий частоту, большую, чем частота поглощённого излучения, а величину $\cos(2\pi(\nu_0 - \nu_1)t)$ – стоксовой компонентой, то есть фотон, имеющий частоту меньше, чем у поглощённого

излучения. Такие понятия используются как при классическом рассмотрении данного явления, так и при квантовом.

Вернёмся к квантовому рассмотрению спонтанного комбинационного рассеяния. Согласно ему, при взаимодействии светового потока с энергией $h\nu$ с молекулой вещества может произойти как упругое рассеивание, называемое релеевским, при котором фотоны просто отклонятся от первоначального направления движения, не увеличив и не уменьшив величину энергии, так и неупругое рассеивание. В этом случае, произойдёт обмен энергии между фотоном и молекулой, в результате которого молекула может отдать или приобрести энергию, величина которой составляет разность между энергиями двух её разрешённых состояний, то есть изменению колебательной и вращательной энергии этой молекулы. Величина энергии фотона после рассеивания составит $h\nu \pm \Delta E$, а частота - $\nu \pm \Delta E/h$. Если после рассеивания фотон имеет частоту, меньшую, нежели частота падающей волны, такое излучение называют стоксовым, в противном случае – антистоксовым.

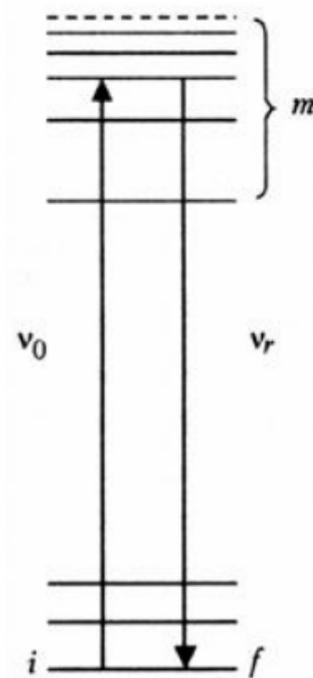
Необходимо отметить, что при увеличении температуры увеличивается количество молекул в возбуждённом состоянии. Смещение частоты $\Delta\nu$ рассеянного излучения свойствами молекул газов и является отличительной чертой данных рассеивающих молекул.

По яркости полос комбинационного рассеивания можно сделать вывод о количестве этих полос. С помощью величины смещения участков спектра при комбинационном рассеивании можно определить наличие или отсутствие конкретного газа в некоторой области атмосферы.

Резонансное рассеивание

Процесс резонансного рассеивания представляет собой двухфотонный одноступенчатый процесс, при котором происходит одновременное исчезновение фотона с частотой ν_0 и испускание нового фотона с другой частотой ν_1 . Основная особенность данного явления – одновременность процессов испускания и поглощения. Также, на этот процесс не влияют процессы релаксации, деполяризации и столкновительные процессы тушения вследствие практически мгновенного протекания.

На диаграмме схематично показаны энергетические уровни молекулы при резонансном рассеянии:



Величина дифференциального сечения резонансного рассеивания (по телесному углу) также зависит от сечения поглощения. При принятии некоторых допущений, останавливаясь на которых подробно не будем, эта

$$\frac{d\sigma_{pp}}{d\Omega} = \frac{\sqrt{\pi \ln 2} c^2 A_{mi}^2 g_m P(\varphi)}{2\omega_e \gamma_D \gamma_N g_i}$$

характеристика описывается выражением:

где A_{mi} - вероятность спонтанного перехода из состояния m в состояние i ; g_m и g_i - статистические веса, показывающие степень вырождения обоих состояний; $P(\varphi)$ - индикатриса рассеяния, которая показывает распределение интенсивности рассеянного излучения по величине угла; γ_D и γ_N - параметры. Величина сечения такого процесса составляет порядка $10^{-12} - 10^{-14}$ см²/ср. При наблюдении такого явления для паров натрия в верхней мезосфере и нижней термосфере этот параметр равняется около $9,8 \cdot 10^{-13}$ см²/ср при длине волны 589 нм.

В таблице приведены значения сечения резонансного рассеивания для различных веществ:

Составляющая атмосферы	Длина волны λ_0 , нм	Температура T , К	σ_r , см ² /ср	Составляющая атмосферы	Длина волны λ_0 , нм	Температура T , К	σ_r , см ² /ср		
Na	589,0	300	$9,8 \cdot 10^{-13}$	N	821,6	166	$5,8 \cdot 10^{-13}$		
		166	$1,2 \cdot 10^{-12}$			166	$1,8 \cdot 10^{-14}$		
		200	$6,1 \cdot 10^{-13}$			166	$8,8 \cdot 10^{-13}$		
K	589,6 766,5	166	$6,6 \cdot 10^{-13}$	O	436,8	166	$3,4 \cdot 10^{-15}$		
		300	$1,7 \cdot 10^{-12}$			200	$5,9 \cdot 10^{-23}$		
		166	$3,0 \cdot 10^{-12}$			He	1083,0	—	$1,59 \cdot 10^{-13}$
		200	$1,1 \cdot 10^{-12}$				388,9	—	$8,0 \cdot 10^{-15}$
Hg	257,3	300	$5,7 \cdot 10^{-13}$	N ₂ (0,0)	1051,0	260 *	$6,0 \cdot 10^{-18}$		
		300	$5,1 \cdot 10^{-14}$	N ₂ (1,0)	885,0	—	$3,2 \cdot 10^{-17}$		
		300	$3,5 \cdot 10^{-15}$	N ₂ (2,0)	748,4	166	$4,2 \cdot 10^{-13}$		
Cd	326,1	300	$1,5 \cdot 10^{-13}$	N ₂ (3,0)	682,4	166	$3,0 \cdot 10^{-13}$		
		300	$5,7 \cdot 10^{-13}$	N ₂ ⁺ (0,0)	391,4	166	$3,5 \cdot 10^{-14}$		
Pb	283,3	300	$4,2 \cdot 10^{-13}$	N ₂ ⁺ (0,0)	391,4	260 *	$3,4 \cdot 10^{-17}$		
Li	670,8	200	$8,2 \cdot 10^{-13}$					N ₂ ⁺ (1,0)	358,2
Mg	285,2	200	$1,6 \cdot 10^{-12}$	N ₂ ⁺ (3,0)	687,2	166	$3,1 \cdot 10^{-13}$		
Ca	422,7	200	$5,7 \cdot 10^{-13}$					N ₂ ⁺ (1,0)	918,0
Ca ⁺	393,4	200	$2,8 \cdot 10^{-13}$	NO	868,3	166	10^{-14}		
Ba	396,6	200	$3,0 \cdot 10^{-12}$					NO	789,8
	Ba ⁺	553,6	200	$1,3 \cdot 10^{-12}$					
Al	455,4	200	$7,9 \cdot 10^{-14}$						
Fe	372,0	200	$3,7 \cdot 10^{-13}$						
Cs	361,2	200	$1,2 \cdot 10^{-12}$						

Примечание. В скобках для молекул даны колебательные квантовые числа v' , v'' ; звездочкой отмечены случаи для ширины линии лазерного излучения $\Delta\lambda_e = 1$ нм.

Вырождение уровня энергии в квантовой механике – наличие нескольких различных состояний системы при одной фиксированной величине энергии. Данное понятие играет важную роль в квантовой теории.

В общем, резонансное рассеяние – частный случай неупругого рассеивания, при котором происходит обмен энергией между фотоном и молекулой. Данный эффект достаточно сложно наблюдать из-за явления резонансной флуоресценции, которая затушёвывает рассеивание.

Молекулярное рассеивание

Молекулярное рассеяние – это явление, при котором фотон отклоняется от первоначального направления движения в результате флуктуаций оптических параметров среды или поверхности вещества. Зачастую, эти флуктуации происходят по величине плотности жидкости или газа. Также, наблюдаются неоднородности по давлению, температуре, концентрации и анизотропии (различия свойств в разных направлениях).

Особенностью такого рассеивания является наличие достаточно сильного взаимодействия между молекулами вещества, а также малая величина расстояния между молекулами. В таком случае, свет дифрагирует на неоднородностях, которые присутствуют в среде и рассеивание является частным случаем дифракции.

Зачастую флуктуации вызваны статистическим характером теплового движения. Также, их причинами могут быть дефекты в кристаллах, капли воды или твёрдых загрязнителей в среде, но в данном случае рассматриваются только флуктуации, не обусловленные посторонними частицами. В таком случае, линейные размеры объёма, в котором наблюдается флуктуация, намного меньше длины волны любого видимого излучения. Время существования неоднородностей зачастую непродолжительно, а также различны законы их развития. При этом, необходимо отметить, что флуктуации являются статистически независимыми.

При молекулярном рассеивании будет наблюдаться изменение частоты рассеянного света вследствие модуляции его интенсивности. В случае воздействия на вещество монохроматического света в рассеянном излучении появятся смещённые частотные компоненты, именуемые компонентами Мандельштама–Бриллюэна. При этом несмещённая линия будет уширена. Также наблюдается широкая полоса, наложенная на общую спектральную картину. Такая полоса называется крыло линии Релея, которая возникает из-за флуктуаций анизотропии.

Для характеристики данного процесса введём новую величину. В данном случае использование такой характеристики, как сечение или дифференциальное сечение не является целесообразным вследствие сложности выведения соответствующей формулы. Также, величины σ и $d\sigma$ будут иметь очень малое значение, что уменьшит наглядность такой характеристики.

Коэффициент объёмного рассеивания – величина, характеризующая мощность излучения, рассеиваемую средой, заключённой в единичном объёме. Данная величина определяется в соответствии с теорией Кабанна-Релея, которая описывает молекулярное рассеивание света при определённых условиях. В соответствии с этой теорией величина коэффициента объёмного

рассеивания составляет:

$$\sigma_R(\lambda) = \frac{8\pi^3 (m_c^2 - 1) (6 + 3\Delta)}{3N\lambda^4 (6 - 7\Delta)}$$

Где m_c – величина показателя преломления среды, Δ – условие деполяризации рассеянного излучения, λ – длина волны, N – количество молекул в единице объёма.

При известных величинах давления и температуры, а также соответствующей им длины волны можно определить объёмного рассеивания для произвольных λ , P , T . В таком случае, σ_R будет

описываться формулой:
$$\sigma_R(\lambda) = \sigma_R^0(\lambda_0) \frac{P_0 T_0}{P T} \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^2$$
, где P_0 и T_0 – известные величины давления и температуры.

При рассмотрении обратного рассеивания необходимо ввести ещё одно новое понятие. Это понятие является чрезвычайно важным при изучении атмосферы и рассеивающих процессов в целом.

Обратное рассеивание – это отражение волн, сигналов или частиц в направлении, противоположном направлению падающей волны или потоку частиц. Иначе говоря, излучение возвращается обратно в том направлении, откуда оно пришло. Часто эта величина обозначается как $\sigma_{R,\pi}(\lambda)$.

Особенно примечательно то, что при молекулярном рассеивании коэффициенты $\sigma_{R,\pi}(\lambda)$ и $\sigma_R(\lambda)$ связаны соотношением: $\sigma_{R,\pi}(\lambda) = 0,119\sigma_R(\lambda)$. Данная формула даёт возможность вычислить плотность воздуха атмосферы на расстоянии.

При молекулярном рассеивании наблюдается уширение диапазона излучения по сравнению с диапазоном источника, которое происходит из-за эффекта Доплера, которое в условиях реальной атмосферы достаточно мало.

Также, необходимо отметить, что молекулы газа способны к поглощению фотонов по механизму, сходному с аэрозольным поглощением. При этом такое явление наблюдается наиболее явно при совпадении спектральной линии лазерного излучения и линией поглощения атмосферного газа. Такие линии зачастую характеризуются положением их центра, которое определяется по формуле: $h\nu_{ij} = E_i - E_j$.

Для примера приведём таблицы, показывающие расположение полос поглощения некоторых изотопов SO_2 и NO_2 , а также расчётные значения частоты линий поглощения для диоксида азота:

Изотопическая модификация	ν_1	ν_2	ν_3
$^{32}\text{S}^{16}\text{O}_2$	1156	522	1366
$^{34}\text{S}^{16}\text{O}_2$	1147	518	1349
$^{32}\text{S}^{16}\text{O}^{18}\text{O}$	1127	513	1346
$^{34}\text{S}^{16}\text{O}^{18}\text{O}$	1120	509	1330
$^{32}\text{S}^{18}\text{O}_2$	1105	500	1322

Полоса	$^{14}\text{N}^{16}\text{O}_2$		$^{15}\text{N}^{16}\text{O}_2$		$^{14}\text{N}^{18}\text{O}_2$
	расчет	эксперимент	расчет	эксперимент	расчет
ν_1	1320, 730	1320	1307, 256	1306	1270, 622
ν_2	749, 652	749, 650	740, 197	740	722, 787
ν_3	1616, 867	1616, 852	1582, 147	1582, 107	1587, 073

Нелинейные эффекты

Причины наблюдения нелинейных эффектов могут быть различны. К ним относят: • нелинейную рефракцию в оптически прозрачной среде, которая подразумевает зависимость показателя преломления от амплитуды светового вектора; • нелинейный характер рассеяния света в среде при больших интенсивностях светового поля; • многофотонное поглощение интенсивного оптического излучения в веществе; • генерацию высших гармоник при переизлучении световой волны; • тепловые самовоздействия.

Для дальнейшего анализа и классификации необходимо ввести новое понятие.

При разложении величины поляризации по величине напряжённости в ряд Тейлора возникают коэффициенты, обозначаемые $\chi_1, \chi_2, \chi_3 \dots$. Данные коэффициенты носят название оптических восприимчивостей. Если данный коэффициент имеет второй и более порядок, он носит название нелинейной оптической восприимчивости.

Собственно нелинейные эффекты обуславливаются действительной и мнимой частью таких нелинейных восприимчивостей. Иначе говоря, природу этих эффектов предопределяет нелинейная поляризованность среды. Такая поляризованность происходит вследствие воздействия сильных световых полей и непосредственно зависит от их интенсивности.

Протекание собственно нелинейных эффектов возможно даже в вакуумной среде, хотя и заметно слабее, нежели в определённых средах и веществах. В условиях вакуума световые импульсы лазерного излучения

рассматриваются как «сгустки» энергии. Согласно общей теории относительности, этим «сгусткам» соответствует определённая масса. Отсюда имеем гравитационное взаимодействие таких масс энергии, а, следовательно, среду, подобную нелинейно-оптической.

К собственно нелинейным эффектам, которые обуславливаются мнимой частью нелинейных восприимчивостей, относят такие эффекты, как: 1) многофотонные процессы (фотоионизация и фотовозбуждение, гиперрассеяние света и другие); 2) вынужденное комбинационное рассеяние света; 3) вынужденное рассеяние Мандельштама – Бриллюэна.

Те нелинейные эффекты, которые обусловлены действительной частью нелинейных восприимчивостей, включают в себя: 1) эффекты генерации высших оптических гармоник; 2) самовоздействие интенсивного светового пучка в нелинейных материалах (например, явление самофокусировки); 2) оптический пробой среды.

Величины этих двух эффектов связаны соотношением: $\text{Im } \chi^{(m)} \sim \text{Re } \chi^{(m+1)*} E$, $m \geq 1$. Эта формула означает пропорциональность эффектов, обусловленных мнимой частью оптической восприимчивости m -ного порядка, и эффектов, обусловленных вещественной частью этой же величины $(m+1)$ -го порядка.

Помимо собственно нелинейных эффектов, возможно протекание так называемых параметрических или некогерентных эффектов. Сущность этих эффектов заключается в нелинейности оптических свойств среды, к которой приводит концентрация некоторого количества энергии в конечном объёме пространства. Такие явления очень слабо зависят или не зависят вообще от интенсивности падающего излучения. К подобным явлениям относят: 1) электрооптический эффект, или эффект Погкельса; 2) эффект Керра.

Характеристика лазерного излучения в атмосфере

При распространении в атмосфере, лазерное излучение претерпевает процессы рассеивания и поглощения, а также процесс рефракции (изменение направления движения на границе двух сред), которым в условиях реальной атмосферы иногда можно пренебречь. При этом пучок фотонов теряет определённое количество энергии. Для характеристики этих энергетических потерь используется величина объёмного коэффициента ослабления, который является параметром в законе Бугера. Это закон имеет вид:

$S_\lambda = S_{0\lambda} e^{-\tau_\lambda m}$, где S_λ – интенсивность излучения, дошедшего до поверхности Земли, $S_{0\lambda}$ – интенсивность (плотность) излучения на верхней границе атмосферы, m – масса атмосферы, τ_λ – толщина слоя, которая, как уже было сказано выше, связана с объёмным коэффициентом ослабления

$$\tau_\lambda = \int_0^\infty \alpha_\lambda(L) dL.$$

соотношением: . Здесь α_λ – описываемый коэффициент. В этом случае экспонента описывает такую характеристику атмосферного слоя, как спектральная прозрачность или пропускание.

Рассмотрим подробнее величину m . Эта величина представляет собой отношение оптической толщины атмосферного слоя, которую проходят лучи от Солнца при зенитном расстоянии (дуга вертикального круга от зенита до Солнца) z , к аналогичному параметру при нахождении Солнца в положении зенита. В том случае, когда зенитное расстояние не превышает 60° , эта характеристика хорошо описывается формулой: $m = \sec z$. В самом общем случае величина массы атмосферы рассчитывается как $m = \int \rho^* ds / \int \rho^* dz$. В большинстве случаев такая формула приводит к очень сложным вычислениям. Для упрощения процедуры подсчёта используют различные модели с теми или иными допущениями. Также применяются таблицы, рассчитанные по формуле Бемпорада.

Параметр объёмного коэффициента ослабления учитывает тепловые потери, происходящие при всех видах взаимодействий фотонов лазерного излучения с молекулами. Также, этот коэффициент является суммой объёмного коэффициента поглощения и рассеивания: $\alpha_\lambda = \alpha_p + \alpha_{\text{п}}$.

Как мы уже определили, рассеивание происходит как на частицах аэрозоли, так и на молекулах газа. Отсюда имеем коэффициент рассеивания в виде соответствующей суммы: .

Также, $\alpha_{\text{п}}$ можно определить как сумму резонансного молекулярного рассеивания, обычного (нерезонансного) молекулярного рассеивания и поглощения фотонов аэрозолями: .

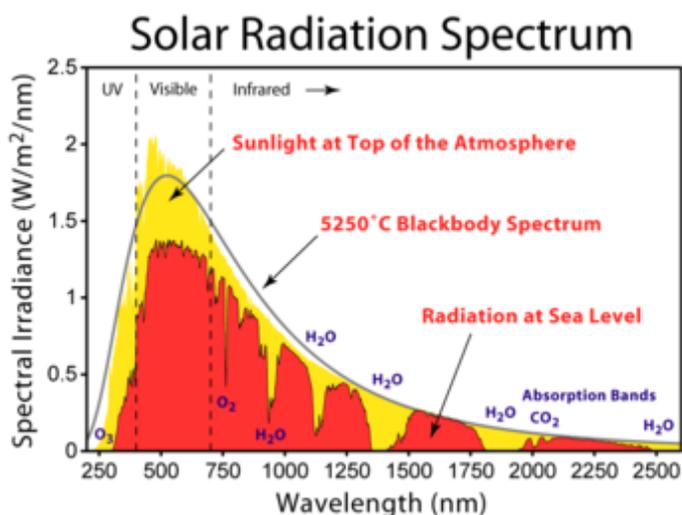
В случае лазерного излучения спектральный диапазон обладает конечной шириной. Если в пределах интервала частоты коэффициент ослабления нельзя считать постоянным, во время зондирования будет регистрироваться не собственно спектральная прозрачность, а функция пропускания, которую искривляет аппаратурная функция источника. Непостоянство коэффициента ослабления зачастую наблюдается в случаях,

когда в области полос поглощения атмосферных газов имеются величины спектральной ширины, сравнимой или меньшей спектральной линии лазера.

Влияние солнечного излучения на лазерное зондирование

Безусловно, фоновая засветка лидара определяется, в том числе и излучением от Солнца, особенно в дневное время. В большинстве, проблема солнечной засветки касается антенных систем, но при этом влияет и на лидарные измерения. Для возможной компенсации данного явления необходимо понимать его механику.

Солнечное излучение – электромагнитное и корпускулярное излучение, которое естественным образом производится Солнцем. Лазерное излучение может иметь различные длины волн, такие, как 405, 445, 520, 532, 635, 660 нанометров. Как видно из графика, представленного ниже, эти длины волн попадают почти на максимум солнечного излучения, вследствие чего вполне ожидаемо смещение полезного сигнала с фоном.



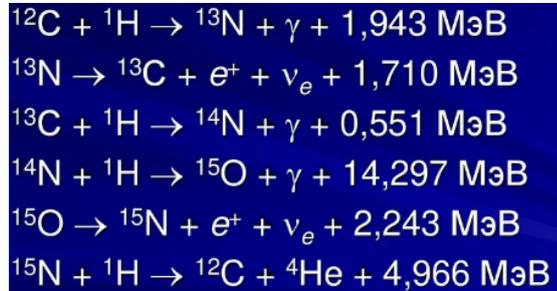
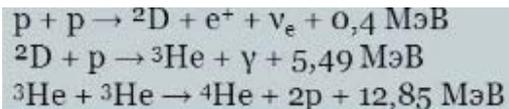
Почти половина всего солнечного излучения приходится на видимый диапазон, ещё более 40% составляют инфракрасный и ультрафиолетовый диапазоны, причём доля ИК излучения намного больше, нежели УФ (приблизительно 46% и 7%). В меньшей степени происходит излучение радиоволн, обусловленное ускорением заряженных частиц и плазменными процессами.

Механизм происхождения интересующей нас части спектра состоит в следующем: вначале происходит синтез водорода, который может протекать

по двум сценариям, а именно: протон-протонный цикл и углеродно-азотный цикл. Соответствующие уравнения реакции будут представлены ниже. Также, при этом процессе генерируются гамма-лучи.

Протон-протонный цикл

углеродно-азотный цикл



В центральной части Солнца имеются свободные протоны и электроны, которые препятствуют прямолинейному выходу гамма-лучей наружу. Вследствие этого, такие лучи поглощаются соседним газом и испускаются в виде рентгеновского излучения, также блокируемого протонами и электронами. В результате серии последовательных поглощений, газ излучает электромагнитные волны с большой величиной λ . Впоследствии, это излучение превращается в инфракрасное, ультрафиолетовое и видимое излучение, которое может быть испущено в виде солнечного света. При этом очень небольшое количество гамма-лучей и рентгеновских лучей всё же излучается наружу. Также, происходит испускание пучков частиц, которое обусловлено солнечными вспышками и самим процессом ядерного синтеза. При этом состав солнечного излучения изменяется при прохождении атмосферы Земли, а именно происходит ослабление ультрафиолетовых лучей.

Явление фоновой засветки – это оптическое излучение, которое попадает на светочувствительный элемент от различных источников, смешиваясь с сигналом, и играет роль помех. Солнечное излучение – один из сильнейших источников фоновой засветки, в том числе и при лидарных измерениях.

Приборы для лазерного зондирования атмосферы

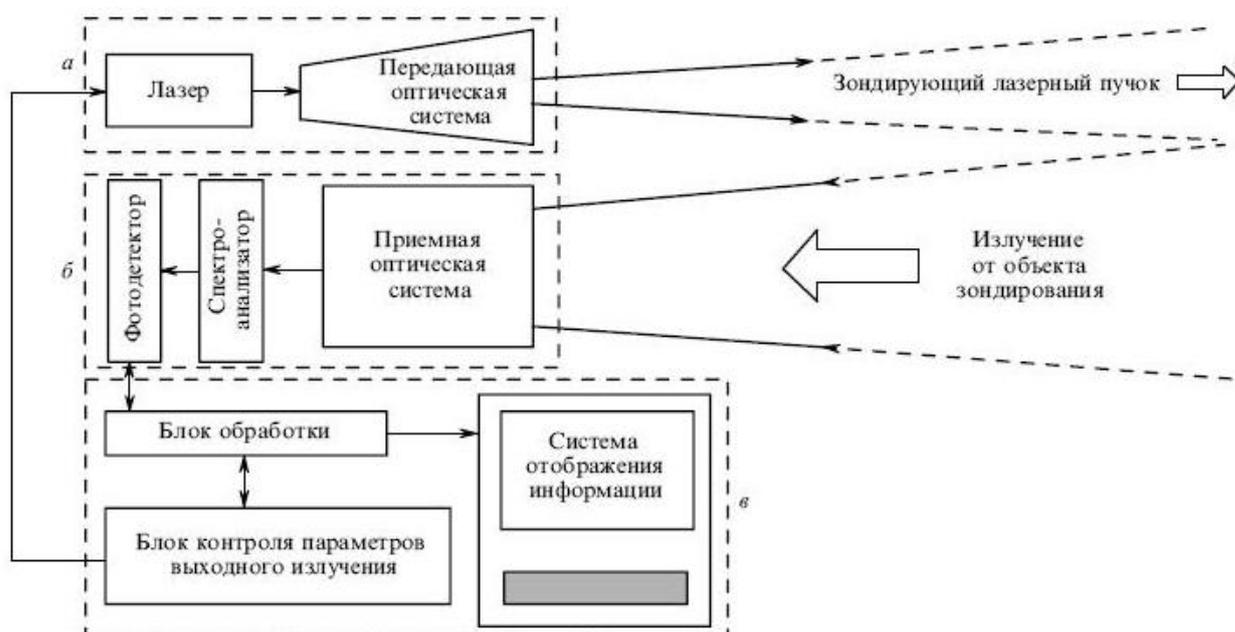
При оптическом зондировании атмосферы взаимодействие фотонов и частиц аэрозоли описывается законами упругого взаимодействия. Лазерное зондирование производится по принципу светолокации, а именно отражения светового лазерного пучка от какого-либо объекта, такого, как аэрозоль. Отсюда и возникла аббревиатура LIDAR (Light Detection and Ranging).

Другое название такой системы – световой локатор, иногда также встречается название «лазерный радар», которое не совсем корректно из-за существования лидаров ближнего радиуса действия, где главные свойства лазера не востребованы.

Общая схема различных лидаров остаётся схожей. Все подобные системы имеют в своей конструкции следующие составляющие:

- Передающая оптическая система;
- Приемная оптическая система;
- Спектроанализатор и фотоприемное устройство;
- Блок обработки сигнала;
- Блок управления;
- Система отображения полученной информации;
- Лазер – передатчик.

Как уже было отмечено ранее, при прохождении через толщу атмосферного воздуха, сигнал претерпевает ослабление, которое дополнительно усиливают аэрозоли. Рассеянное излучение направляется на приёмник лидара, после чего, пройдя систему приёмной оптики, попадает на фотодетектор. В результате это излучение преобразуется в электрический сигнал, пропорциональный по интенсивности принятому излучению. На схеме показано общее устройство подобной системы.



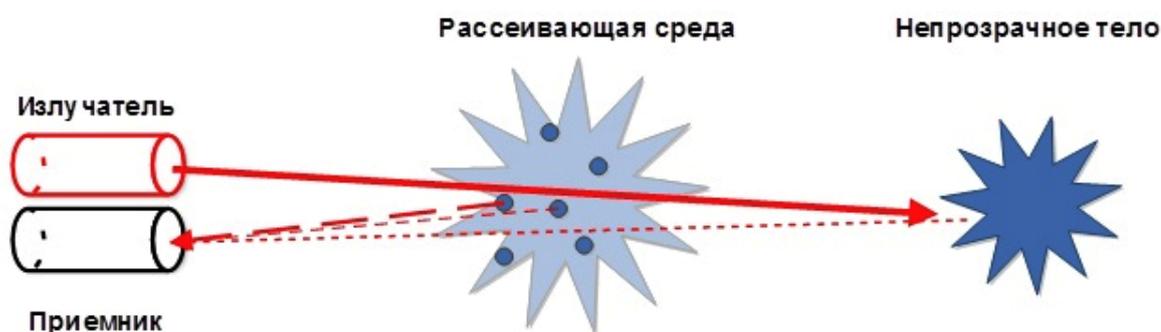
Как уже было сказано, в современных лидарах генератором излучения является лазер с сильными импульсами излучения и узким спектральном

диапазоне. Иначе говоря, такое излучение является почти монохроматическим.

Активная среда лазера – тот элемент, в котором происходит процесс преобразования энергии внешнего источника в электромагнитные колебания видимого или инфракрасного диапазона. Данный компонент системы является одним из важнейших в устройстве лазера.

Оптический резонатор – это устройство, представляющее собой несколько отражающих элементов, главная задача которого – формирование частотных и пространственных характеристик излучения лазера.

В основном, используется классификация таких систем по типу активной среды. На рисунке представлен пример работы лидарной установки.



Газовые лазеры

Газовые смеси, выступающие в роли активной среды в таком устройстве, имеют важную отличительную особенность: они могут значительно усиливать направленный поток. Также, газ достаточно однороден и имеет малую плотность, что даёт ему некоторые преимущества перед жидкостью или твёрдым телом в такой роли.

Такое устройство состоит из герметичной трубки и оптического резонатора, активной средой является газообразное вещество. Трубка изготавливается из корундовой керамики и размещается между отражающей призмой и зеркалом на цилиндре из бериллия. Катоды изготавливаются из оксида тантала и зачастую разделяются надвое прокладкой из диэлектрического материала. Эта прокладка обеспечивает однородность распределения электрического тока. Аноды представляют собой вакуумные сильфоны из нержавеющей стали.

При работе такой системы происходит ионизация газа потоком электронов или электрический разряд внутри трубки прибора, а также используются такие процессы, как некоторые химические реакции, газодинамические процессы, процессы с участием продуктов ядерного расщепления. Разряд производится в двух различных секциях, имеющих общий катод, при помощи постоянного тока. В результате разряда создаётся основа для излучения. После этого происходит вынужденное испускание фотонов, которое усиливается при прохождении света по газовой плазме. С помощью системы зеркал задаётся направление светового потока лазера. Для поддержания излучения, лазер снабжён полупрозрачным зеркалом, отбирающим из луча некоторую долю фотонов. Остальные фотоны отражаются внутрь трубки.

Такое устройство имеет разрядную трубку диаметром около 1,5 мм. Диаметр катода из оксида тантала составляет около 48 мм, а его длина – 51 мм. Постоянный ток, под действием которого работает данный лазер, имеет напряжение 1000 В. В таких лазерах используются такие газы, как диоксид углерода (CO_2), окись углерода (CO), азот (N_2), галиды инертных газов, пары металлов.

Использование газовых лазеров даёт такие преимущества, как:

- Возможность длительного использования системы при комнатной температуре;
- Достаточно высокий уровень монохроматичности (ширина спектра излучения гелий-неонового ОКГ составляет порядка нескольких герц);
- Высокая устойчивость и способность воспроизведения частоты, высокая пространственная и временная когерентность;
- Малый угол расходимости луча;
- Слабая восприимчивость к изменениям температуры окружающей среды;
- Широкий диапазон рабочих частот.

Рассмотрим подробнее некоторые типы газовых лазеров в следующих разделах.

Криптоновый лазер

Криптоновый лазер – это тип газового лазера, в котором в качестве активного вещества используются ионы благородного газа криптона Kr.

Для генерации излучения создаётся газовый разряд в охлаждённом тонком капилляре. Газ поддерживается под давлением в несколько десятков Паскаль. В центре капилляра повышается концентрация электронов с помощью магнитного поля. Это поле сжимает разряд, который не может соприкоснуться со стенками. Катод испускает электроны, которые движутся к аноду по капилляру под действием магнитного поля. Газ при этом также смещается к аноду, что может привести к гашению разряда вследствие увеличения давления у анода. Во избежание гашения заряда катодную и анодную полости соединяют обводной газовой трубкой. Для современных криптоновых лазеров капилляры изготавливаются из металлокерамики, также возможно использование окиси бериллия.

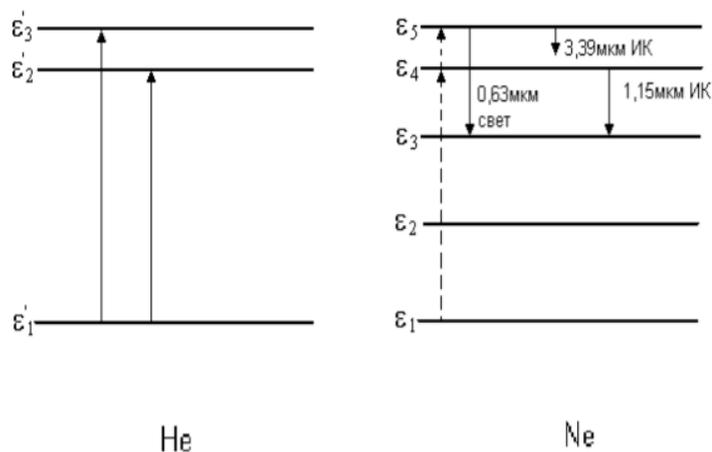
Излучение криптонового лазера производится на 406,7 нм, 413,1 нм, 415,4 нм, 468,0 нм, 476,2 нм, 482,5 нм, 520,8 нм, 530,9 нм, 568,2 нм, 647,1 нм, 676,4 нм. При $\lambda = 647,1$ нм наблюдается наиболее интенсивная линия генерации. Мощность излучения при данной длине волны может составлять 1-3 Вт.

Основным достоинством такого лазера является широкий диапазон длин волн, который необходим при различных исследованиях. Но при этом, такое устройство имеет несколько существенных недостатков, таких как короткий срок эксплуатации (менее 2000 часов), чувствительность к изменениям внешних условий, низкая выходная мощность. Также, такой лазер, в общем и целом менее надёжен, поэтому его использование очень ограничено.

Такие лазеры зачастую используются в голографии при копировании голограмм, имеющих большой формат, в медицине, а также в различных научных целях.

Гелий-неоновый лазер

Гелий-неоновый лазер – это лазер, активной средой которого является смесь гелия и неона. При этом именно атомы неона являются рабочим телом в таком устройстве. На схеме ниже показаны энергетические состояния этих газов.



Механизм работы такого лазера основан на пропускании электрического тока через газовую смесь, в результате чего образуются свободные электроны, которые приобретают ускорение под воздействием электрического поля. Это приводит к столкновению электронов с частицами газа, которые переходят в возбуждённое состояние. При этом электроны целиком или частично отдают свою энергию. Такой процесс происходит согласно следующему уравнению: $He^* + Ne + \Delta E \rightarrow He + Ne^*$, и передача возбуждения оказывается очень эффективной. В результате таких переходов возникает инверсия заселённости уровней, после чего становится возможной генерация излучения.

Такая лазерная установка может генерировать излучения на длине волны, равной 632,816 нм, 3,39 мкм, 1,15 мкм, 543,5 нм, 594 нм, 612 нм. При этом ширина полосы излучения гелий-неонового лазера очень мала (около 1,5 Гц). Такое значение во многом обуславливается эффектом доплера (уширением) атомов неона.

Гелий-неоновые лазеры имеют ряд достоинств, таких как возможность производства в промышленных масштабах; независимость срока службы от теплового режима; отсутствие других факторов, ограничивающих срок эксплуатации. Такие лазеры часто используются для лидарных измерений.

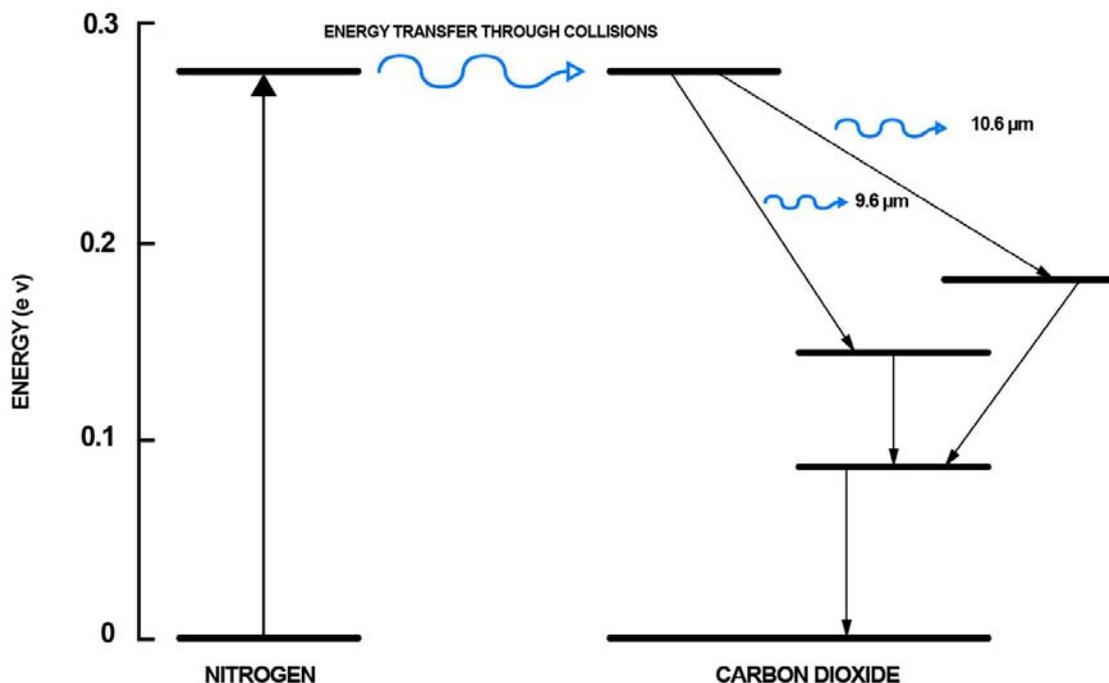
Углекислотный лазер

Углекислотный лазер – лазер, активная среда которого представляет собой углекислый газ CO_2 . В таких газах присутствует примесь других газов таких, как гелий, азот, иногда – водород, водяной пар, в некоторых случаях – ксенон, необходимых для возбуждения молекул CO_2 , а также обеспечения релаксации энергии и для других процессов.

Принцип работы такой установки аналогичен большинству газовых лазеров. Через газовую смесь проходит электрический ток, который может быть как постоянным, так и переменным (например, 20-50 кГц), редко – разряд управляется волнами радиочастотной области. Молекулы азота переходят в метастабильное вибрационное состояние и передают энергию молекулам CO₂ при взаимодействии с ними. В отличие от многих других лазеров, углекислотный лазер генерирует излучение в инфракрасном диапазоне с длинами волн от 9,4 до 10,6 мкм. Лазерная генерация происходит

на тех длинах волн, которые удовлетворяют условию: $\lambda = \frac{2d}{m} \cos \theta$, где d – период решетки; m – порядок дифракционного максимума. Мощность такого устройства составляет от ~ 10 Вт до ~1кВт. Ниже представлена схема энергетических переходов в углекислотном лазере.

CO₂ LASER



Преимущества такого лазера включают: отличное качество обработки; низкие затраты энергии; простота конструкции; универсальность (взаимозаменяемость) лазерных трубок; широкий спектральный диапазон режимов излучения. В качестве недостатков можно выделить нестабильность лазерной установки при низкой мощности и зависимость

работы трубки от стабильного охлаждения, а также хрупкость конструкции трубки.

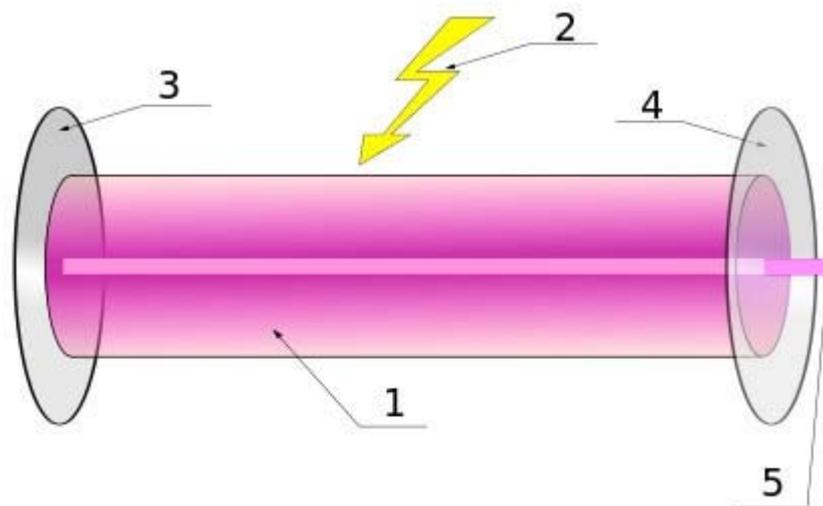
Помимо частого применения такого устройства в лидарном зондировании, CO₂-лазер применяется в лазерных дальномерах прицелов.

Твердотельные лазеры

Твердотельные лазеры – это такие лазеры, в которых в роли активной среды выступает твёрдое тело. Такая система имеет множество особенностей и некоторые преимущества.

Твердотельная лазерная установка состоит из активной среды в виде цилиндра и оптического резонатора. Для накачки энергии используется инфракрасное или видимое излучение.

Ниже приведена схема устройства такого лазера.



Здесь 1 – активна среда; 2 – система накачки; 3 – зеркало (непрозрачное); 4 – полупрозрачное зеркало; 5 – лазерный луч.

При прохождении пучка фотонов, происходит их отбор по аналогии с газовым лазером. Для этого на установке имеется полупрозрачное зеркало. Некоторая часть фотонов отражается внутрь.

Твердотельный лазер может работать как в непрерывном режиме, так и в импульсном. Пульсация осуществляется двумя способами: с помощью накачки или оптическим переключателем. При применении комбинации этих двух способов возможно достижение максимума мощности, который составляет несколько мегаватт, на несколько наносекунд.

Зачастую, для активной среды твердотельного лазера применяются такие материалы, как керамические материалы, стёкла и кристаллы с различными легирующими добавками, такими, как неодим, хром, эрбий, тулий или иттербий. Именно эти добавки, а не сам материал, определяют оптические свойства активной среды. Элемент-носитель очень слабо влияет на лазерные свойства среды. Вообще, существует множество видов твердотельных лазеров с тем или иным материалом-носителем и легирующими добавками, получили распространение следующие:

- рубиновый лазер,
- алюмо-иттриевый лазер, допированный неодимом (Nd:YAG-лазер, неодимовый лазер),
- лазер на фториде иттрия-лития с легированием неодимом (Nd:YLF-лазер),
- лазер на ванадате иттрия (YVO_4) с легированием неодимом (Nd:YVO-лазер),
- лазер на неодимовом стекле (Nd:Glass-лазер),
- титан-сапфировый лазер,
- алюмо-иттриевый лазер с легированием тулием (Tm:YAG-лазер),
- алюмо-иттриевый лазер с легированием иттербием (Yb:YAG-лазер),
- алюмо-иттриевый лазер с легированием гольмием (Ho:YAG-лазер),
- Ce:LiSAF-лазер, Ce:LiCAF-лазер,
- лазер на александрите с легированием хромом (александритовый лазер),
- лазер на фториде кальция, легированном ураном (U:CaF₂-лазер),
- волоконный лазер с легированием эрбием,

– лазеры на халькогенидах цинка/кадмия, легированных переходными металлами (хромом, железом) ($\text{TM}^{2+}:\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$ -лазер, $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазер, $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазер, $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазер).

Твердотельные лазеры обладают рядом преимуществ:

- Большая удельная мощность;
- Высокое качество при большой мощности (TEM00);
- Высокий коэффициент полезного действия (с диодной накачкой) 20%;
- Большая энергия (до кДж/импульс);
- Широкий диапазон длин волн;
- Широкий диапазон длительностей импульсов (от 10^{-2} до 10^{-14} с);
- Возможность генерации ультракоротких импульсов – до 4 фемтосекунд;
- Возможность передачи излучения по оптоволокну;
- Возможность внутривибраторного удвоения частоты генерации;
- Большая яркость.

Полупроводниковые лазеры

Данный тип лазера – частный случай твердотельного лазера, в котором роль рабочего вещества играет полупроводник. Эти типы лазеров имеют очень схожее устройство, отличие заключается в некоторых особенных свойствах полупроводника и в принципе работы.

Генерация излучения происходит при межзонном переходе электронов в условии низкой концентрации вещества-носителя. Механизм самого излучения основан на вынужденном испускании фотонов. Для подробного описания принципа действия такого лазера необходимо ввести новое понятие.

Инжекция – это процесс, при котором создаются высокие концентрации неравновесных носителей заряда при пропускании электрического тока в прямом направлении через p-n-переход в областях, прилежащих к этому переходу.

Энергия всех светодиодов обуславливается процессом спонтанного излучения, при котором происходит смещение в прямом направлении диода после подачи на анод положительного заряда. При этом происходит инжекция дырки в область p из области n перехода, а далее – в область p полупроводника. При нахождении электрона и дырки в непосредственной близости, происходит процесс рекомбинации (объединения). При этом выделяется фотонная энергия с определённой длиной волны и фонона.

В некоторых случаях, дырка и электрон могут находиться долгое время

в одном месте перед рекомбинацией. При прохождении в этот момент в близости от них фотона, имеющего определённую резонансную частоту, произойдёт процесс вынужденной рекомбинации, в результате которого происходит выделение второго фотона с тем же направлением, фазой и вектором поляризации, что у первого фотона.

Кристалл полупроводника имеет прямоугольную форму и представляет собой тонкую пластинку. Эта пластинка служит своего рода волноводом и ограничивает объём излучения. Поверхность кристалла, модифицируясь, образует область n, когда как нижний слой необходим для создания области p. При этом возникает p-n переход, имеющий большую площадь, а также плоскую форму. Для создания оптического резонатора производится полировка двух параллельных торцов кристалла. Некоторый случайный фотон, идущий по волноводу, проходит всегда перпендикулярно плоскости спонтанного излучения после чего, несколько раз отразившись от торцов, проходит вдоль резонаторов, тем самым вызывая вынужденную рекомбинацию. В результате этого процесса создаются новые фотоны с аналогичными характеристиками, и происходит усиление излучения. Луч возникает после того, как фотоны могут преодолеть потери энергии за счёт уже указанного усиления.

Мощность полупроводникового лазера составляет порядка 1мВт – 10кВт. Такой тип лазеров также поддерживает как непрерывный режим, так и импульсный, для перенастройки используются такие способы, как изменение тока, давления, температуры или наложение магнитного поля. Минимальная длина импульса в таком устройстве составляет около 100 фемтосекунд.

Существует множество разновидностей полупроводниковых лазеров. Различие между различными видами таких устройств заключается в ширине волновода, формы линзы, ширина запрещённой зоны. При этом большинство из них выполняются на особо тонком слое, и позволяет формировать только параллельные лучи. Перечислим некоторые виды таких лазеров: гетероструктурный лазер с отдельным удержанием, лазеры с обратной связью, лазер с двойной гетероструктурой, VCSEL и VECSEL лазеры.

Существует отдельный тип полупроводниковых лазеров, имеющий несколько отличный принцип работы, а именно квантовый каскадный лазер. В таком лазере используются заряды одного знака. При этом фотоны излучаются без использования дырок при переходах электронов между подзонами. При определённых заданных условиях (составе потенциальных ям, толщине слоёв и токе накачки) происходит инверсия населённости в подзонах, вследствие чего генерируется излучение. В таком случае движение электронов представляет собой каскад переходов, сопровождающийся

излучением фотонов, происходящий между соседними потенциальными ямами.

Наиболее распространённые полупроводниковые лазеры – это InGaN/GaN (длина волны 405–450 нм), AlGaInP (635–670 нм), GaAlAs (785–808 нм), GaAs/AlGaAs (850–890 нм), InGaAs (980 нм), InGaAsP (1300–1600 нм).

Несмотря на разнообразие видов полупроводниковых лазеров, область их применения весьма ограничена вследствие существенного недостатка, а именно малой выходной мощности, которая составляет около 10 Вт. В лидарных системах используется, хотя и весьма ограниченно, только лазер на арсениде галлия (GaAs), которые позволяют принимать излучение на длинах волн 0,84 и 0,9 мкм. Такие лазеры работают в импульсном режиме, обеспечивая мощности до 200 Вт. Частота импульсов может составлять до 2 кГц.

Несмотря на наличие существенных недостатков, данный тип лазера имеет множество достоинств, не присущих другим типам. К преимуществам таких систем можно отнести очень большой показатель оптического усиления, крайне малые размеры лазерной установки (к примеру, длина резонатора может составлять несколько мкм, в среднем - 200-300 мкм), малая инерционность, высокий КПД, возможность выполнения плавной спектральной перестройки, широкий выбор элементов для генерации в обширном спектральном диапазоне. Также, такие устройства обладают менее фундаментально важными, но практически применимыми достоинствами: совместимость с другими полупроводниковыми приборами, возможность монолитной интеграции, возможность электронного управления режимом генерации, а также параметрами излучения такими, как длина волны, степень когерентности, количеством спектральных мод, возможность высокочастотной модуляции излучения, малое напряжение (<1-3 В) электропитания, наибольшая долговечность.

Приёмники излучения

Принимаемый сигнал в виде электромагнитного излучения проходит вначале через систему линз, называемую приёмной оптикой, а далее направляется на спектроанализатор, который представляет собой набор узкополосных фильтров. После этого излучение попадает на блок фотодетектирования, который необходим для отделения исследуемого излучения от фонового посредством выбора определённого промежутка длин волн.

Для приёма эхо-сигналов используется два метода: энергетический, также называемый некогерентным, при котором фотоустройство

воспринимает только информацию об энергии, а не фазе сигнала излучения; гетеродинный способ, при котором применяются свойства когерентных лучей, и используется когерентный приём сигнала.

Первый метод используется при слабом сигнале, то есть при достаточно разреженном пучке фотонов, попадающим на фотоприёмник. В таком случае на приёмном устройстве регистрируются короткие импульсы от отдельных фотонов, обработка и анализ такого сигнала затруднены.

При гетеродинном методе принимающее устройство регистрирует огибающую эхо-импульса, а не импульсы отдельных фотонов, что даёт возможность наблюдать и анализировать полную картину информации об отражающем объекте.

Для более точного описания второго метода необходимо охарактеризовать важнейшую его деталь. Гетеродин – это генератор малой мощности, используемый для создания волн вспомогательной частоты при преобразовании частоты высокочастотных сигналов. Механизм работы такой системы следующий: после того, как сигнал поступает на вход фотодетектора, одновременно с этим на детектирующее устройство поступает излучение от гетеродина, вследствие чего образуются колебания комбинационных частот. Из этих колебаний одно подвергается фильтрации и усилению, после чего в устройстве сравнивается с пороговым значением.

Такой способ позволяет исключить тепловые воздействия и существенно увеличить чувствительность, что, несомненно, важно для получения большей точности данных и удобства обработки и анализа сигнала. Но при этом, такая система нуждается в стабильном гетеродине. Также, необходимо точное соблюдение условия равенства фаз излучения от гетеродина и эхо-сигнала. С учётом всех достоинств и недостатков, в современных лидарных системах применяются те методы, которые легче осуществить практически, такие, как метод прямого детектирования.

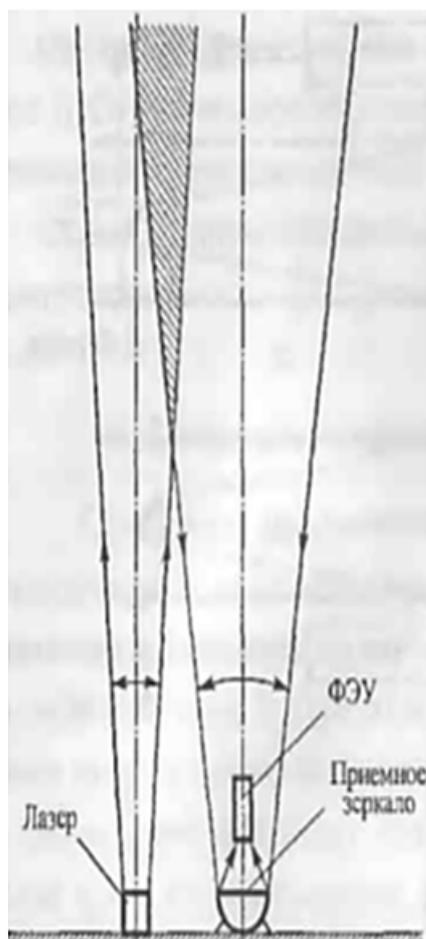
Схемы лидарного зондирования атмосферы

При самом общем рассмотрении, все схемы дистанционного зондирования атмосферы можно разделить на две категории: пассивные методы и активные методы. При использовании пассивных методов, изучению подвергаются естественные излучения, присутствующие в атмосфере, такие, как солнечное. По результатам наблюдений взаимодействий этих излучений с изучаемым объектом можно получить, например, информацию о концентрации загрязняющей аэрозоли. При активных методах производится запуск в атмосферу излучения, зачастую лазерного, и аналогичным образом исследуются взаимодействия фотонов с

веществом. При этом источником информации является рассеивание, поглощение, флуоресценция. Также необходим учёт эффекта Доплера и нелинейных эффектов.

При активных методах возможно совмещение приёмника и передатчика при лидарном зондировании. Такая схема называется моностатической и, несмотря на то, что она применяется достаточно часто, имеет несколько существенных недостатков.

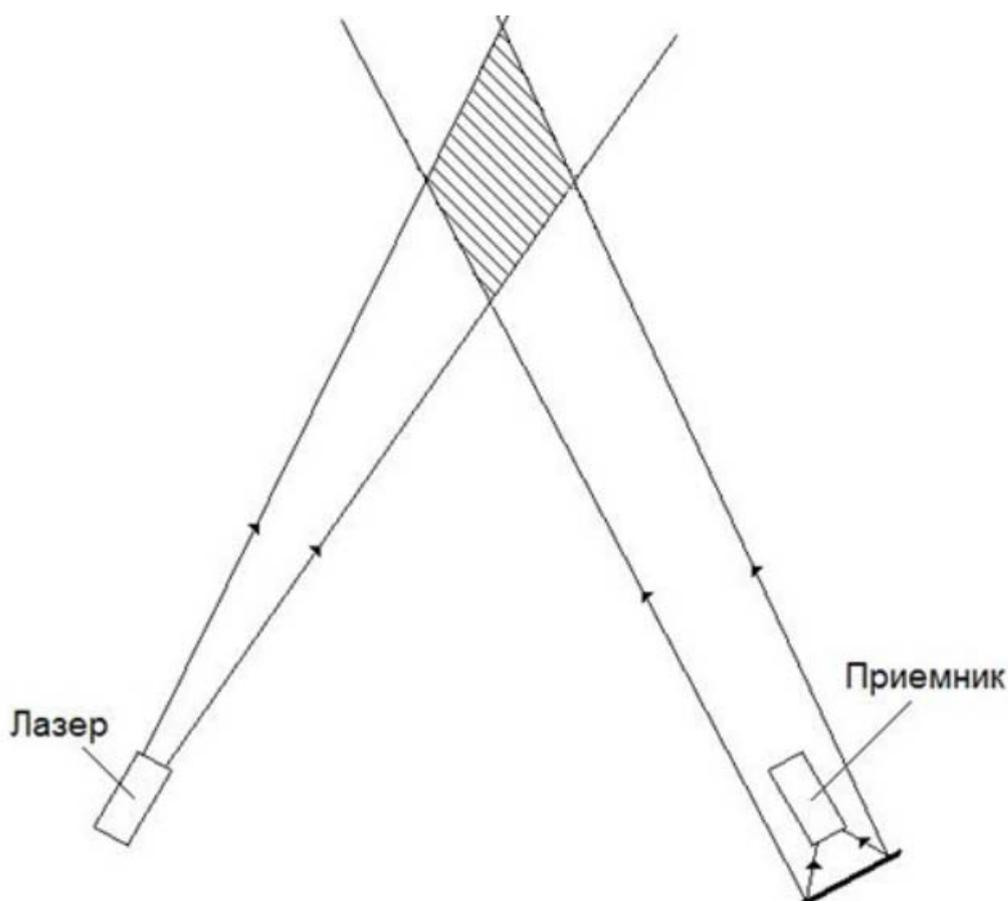
Устройство такой схемы заключается в следующем: лазерная установка и приёмное устройство располагаются в одном месте и одном поворотном устройстве, что позволяет изменять зенитный угол и азимут. При этом используются только импульсный режим работы лазера для обеспечения возможности принять эхо-сигналы из различных слоёв атмосферы и дальнейшей обработки сигнала. Данное ограничение обуславливает некоторые недостатки данного устройства, например, регистрация коротких импульсов, и, как следствие, затруднения в расшифровке такого сигнала. На изображении снизу показана моностатическая схема лидара с малой базой.



В случае разделения приёмника и передатчика, возможно два типа схем: бистатические системы и трассовые методы. Рассмотрим каждую из этих схем подробнее.

При использовании бистатической схемы лазерный пучок от источника излучения проходит в поле зрения детектирующего прибора только на некотором небольшом расстоянии, иначе говоря, оптические оси лазера и приёмника пересекаются под различными углами на различной высоте, вследствие чего измерения проводятся в ограниченном пространстве атмосферы при фиксированной высоте пересечения осей. В случае изменения угла наклона оптической оси одного из приборов можно исследовать вертикальный профиль параметров атмосферы. Одна из главных особенностей такой схемы – большое расстояние (база) между устройством приёма и передачи, размер которой задаётся заранее. Удобство данной схемы заключается в возможности зондирования некоторого локализованного объёма атмосферы и изменения его состава. При такой схеме приоритетно использование непрерывного режима лазера.

Ниже представлено схематичное изображение системы такого типа.



Трассовые методы дистанционного зондирования основаны на измерении параметра поглощения лазерного луча в атмосфере. При такой схеме возможны различные вариации взаимного расположения приёмного телескопа и лазерной установки. Эти устройства могут быть разнесены и

направлены друг к другу, что является не самым целесообразным расположением. Для упрощения работы источник и приёмник располагаются в одном месте, после чего необходимо совместить их оптические оси и направить их на изучаемый объект. При этом, два лазерных луча настраиваются на разные длины волн следующим образом: длина волны одного луча должна совпадать с линией поглощения, например, молекулы аэрозоли, а другого – располагаться вне линии поглощения. В результате сравнения сигналов можно получить значение концентрации загрязняющих аэрозолей вдоль пути прохождения луча. При таком методе в результате получается лишь интегральная характеристика, информацию о распределении концентрации загрязнителя по высоте получить невозможно.

Современные лидарные системы

Как уже было отмечено, дистанционное зондирование атмосферы в видимом диапазоне – один из самых эффективных методов получения информации о химическом составе и физических процессах в газовой оболочке на данный момент. Вследствие очень широкого применения в различных областях таких систем (в экологии, метеорологии, климатологии, метеорологическом обеспечении деятельности авиации, ветроэнергетике) существует большое количество лидарных систем различного назначения.

В настоящее время лидарные системы не теряют свою актуальность благодаря нескольким важнейшим свойствам, которые включают достаточно высокую точность, многофункциональность, стабильность и независимость от внешней среды. Также, имеет значение стоимость такого прибора.

Рассмотрим вначале кратко два прибора, предназначенные для измерения высоты облаков и профиль скорости ветра. Так как в данной работе целью является измерение других параметров, подробно останавливаться на этих устройствах не будем.



Длина волны, нм	1535
Класс безопасности	Class 1
Диапазон измерений ВНГО, м	0–7500
Период выдачи измерений, с	2–120
Точность измерения, м	±5
Интерфейсы	Ethernet, RS-232, RS-485, Модем
Электропитание	187–247 В, 50Гц
Условия эксплуатации	–50...+50 °С
Габаритные размеры	Ø530 × 860 мм
Масса	30 кг

Облакомер SKYDEX



Дальности измерения	от 5 до 300 м
Диапазон измерения скоростей	от 1 до 40 м/с
Диапазон измерения направления ветра	от 0 до 360°
Длина волны лазерного излучения	1550 нм
Пространственное разрешение, от дистанции фокусировки не хуже	± 10%
Время обновления данных о скорости и направлении ветра	4 с
Режим сканирования	VAD
Масса	70 кг
Габаритные размеры	450 × 900 × 1300 мм

Профилометр лидарный

ветровой ПЛВ-300

Для измерения концентрации в атмосфере водяного пара, а также микрофизических характеристик аэрозоля и солнечной радиации применяется солнечный автоматический фотометр CimelCE-318. Для измерения концентрации водяного пара в виде осадённой воды в данном устройстве применяется канал с длиной волны 940 нм.

Для определения оптической толщины применяется закон Бугера для всех длин волн. При этом не учитывается ни Релеевское рассеивание, ни поглощение озоном и какими-либо другими загрязняющими газами.

Технические характеристики: рабочие длины волн: 340, 380, 440, 500, 670, 870, 940 и 1020 нм;

Спектральная полуширина: 10 нм;

Угол приема солнечного коллиматора: 1.2°;

Детектор: Кремниевый фотодетектор;

Метод сканирования: Сканирование по углу места и азимуту;

Погрешность сканирования: 0.1°;

Энергопитание: Внешняя батарея и солнечная панель

Вывод оптического фильтра: < 1% / год

Автоматическое крепление: Азимутальные и зенитные двигатели

Угловое сканирование неба: Все небо:

Азимут: 0 – 360°

Зенит: 0 – 180°

Точность солнечного слежения: 0.01°

Потребляемая мощность: < 2 Вт

Полоса пропускания интерференционного фильтра: < 30 нм

Как уже было отмечено выше, данное устройство применяется для мониторинга концентрации водяного пара и атмосферных аэрозолей, а также для измерения солнечной радиации и таких параметров аэрозоли, как альбедо, распределение аэрозолей по размерам, динамику роста.



Далее рассмотрим лидарную систему, предназначенную преимущественно для исследования аэрозолей.

Мобильный сканирующий УФ флуоресцентно-аэрозольный лидар «ФАРАН-М1»

Данный лидар предназначен для обнаружения в атмосферном воздухе различных аэрозолей, а также для выделения среди них аэрозолей биологического происхождения, таких, как физиологически активные вещества. В частности, такие измерения могут предназначаться для мониторинга и оценки интенсивности вредных выбросов и оптического состояния атмосферы.

В таком лидаре реализована схема, при которой возможно одновременное наблюдение эхо-сигналов упругого рассеяния и флуоресценции. Такие наблюдения производятся при длинах волн лазера 1064 и 266 нм. Интересной особенностью при таких наблюдениях является то, что в инфракрасном канале сигнал формируется аэрозолями любой природы, а в ультрафиолетовом канале – аэрозолями только биогенного происхождения.

Ниже приведены технические характеристики этого прибора:

Дальность действия, не менее, км	10
- аэрозольного канала ИК диапазона при обнаружении аэрозоля	2
- флуоресцентного канала УФ диапазона при обнаружении аэрозоля биогенного происхождения	
Пороговая чувствительность на максимальной дальности, см ⁻³	100
Длина волны возбуждения, нм	
- ИК канал	1064
- УФ канал	266
Длина волны регистрации, нм	
- ИК канал	1064
- УФ канал	350
Ширина полосы приема, нм	
- ИК канал	4
- УФ канал	50
Диапазон углов сканирования, градусы	
- по азимуту	±180°
- по углу места	5 - 90°
Скорость сканирования, градусов/мин	60
Диаметр приемного телескопа, м	0,35



Многоволновой мобильный лидар МВЛ-60 МОБ

Далее, также рассмотрим устройство, главной целью которого является определение концентрации и размеров частиц, выбрасываемых различными предприятиями, такими, как цементные и металлургические.

Мобильный лидар МВЛ-60 предназначен для оперативной оценки характеристик атмосферного аэрозоля. Рабочими каналами прибора являются 1064, 532 и 355 нм. Для оперативного анализа такое устройство размещают в фургон автотракторного прицепа или другое транспортное средство. Данная установка учитывает как рассеяние лазерного луча частицами аэрозоли, так и собственно молекулами воздуха (релеевское рассеивание).

Область применения такого лидара включает не только мониторинг загрязнений в атмосфере, но и контроль за возгоранием пожаров в городах и промышленных центрах. Ниже представлены технические характеристики такого прибора.

ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ	
Метод измерения	Некогерентное обратное рассеяние
Измеряемые вещества	Частицы пыли промышленного происхождения, аэрозоль, облака
Диапазон измерений	2 – 12 км
Разрешение по вертикали	15 м (типично - 150 м)
ИЗЛУЧАТЕЛЬ	
Лазер	LS-2137
Длины волн	1064, 532, 355 нм
Энергия импульса	
– на длине волны 1064 нм	550 мДж
– на длине волны 532 нм	300 мДж
– на длине волны 355 нм	120 мДж
Частота повторения импульсов	от 1 до 10 Гц
Длительность импульса лазерного излучения по уровню 0,5	не более 15-17 нс
Диаметр пучка лазерного излучения по уровню 0,9	не более 8 мм
Угловая расходимость лазерного луча по уровню 0,5	не более 2 угл. мин
Электропитание	Однофазное 220 В, 50 Гц, 10 А
Потребляемая лазером мощность	не более 1000 Вт
ПРИЕМНИК	
Диаметр главного зеркала телескопа	600 мм
Поле зрения телескопа	2,1 – 10 угл. мин
Число приемных каналов	2 – 4
Полоса пропускания интерференционных	
фильтров по уровню 0,5:	
– на длине волны 1064 нм	4 нм
– на длине волны 532 нм	2,0 нм; 3,0 нм
– на длине волны 387 нм	3,9 нм
– на длине волны 355 нм	5,0 нм
Режим обработки сигналов	Аналоговый
Фотоприемники	Лавинный фотодиод , ФЭУ-100 (3 шт.)
АЦП	Два 30 МГц / 12 бит, двухканальные
ТРАНСПОРТНОЕ СРЕДСТВО	



Анализатор парниковых газов GGA-24EP

Данный лазерный прибор используется для измерения концентрации метана (CH_4), углекислого газа (CO_2) и водяного пара (H_2O), причём данные измерения проводятся одновременно. Для расчёта концентраций производится определение интегрального поглощения в линиях соответствующих газов.

Такой прибор обладает несколькими важными достоинствами: его использование несложно, а также не требует высокой мощности. К тому же, прибор обладает высокой прочностью и устойчивостью к изменению температуры. Измерения производятся с достаточно высокой точностью, линейностью и достоверностью.

Технические характеристики: Общая погрешность $< 0,25\%$ от показания (без калибровки, модель серии EP)

Максимальный дрейф

- 15 минутное усреднение при STP (стандартном давлении и температуре) за 24 часа
- CH_4 : 0,8 ppb
- CO_2 : 120 ppb
- H_2O : 100 ppm или 1% от показания, в зависимости от того, какое показание больше.

Диапазон измерений

- CH₄: 0.1-25 ppm
- CO₂: 200-4000 ppm
- H₂O: 7000-70000 ppm

Рабочий диапазон

- CH₄: 0-1000 ppm
- CO₂: 0-20000 ppm
- H₂O: 0-70000 ppm

Точность (1σ, 5 сек / 100 сек)

- CH₄: 1 ppb / 0.3 ppb
- CO₂: 150 ppb / 50 ppb
- H₂O: 100 ppm / 30 ppm

Время ответа

Время прохождения потока через измерительную ячейку:

- <0.1 сек. (требуется внешний насос для ответа в 10 Гц);
- 10 сек. (со стандартным вакуумным насосом).

Эксплуатационные требования

- Влажность окружающего воздуха: < 98% RH без конденсации.
- Рабочая температура: 0-45 °C.



Определение коэффициента ослабления

Теоретическое обоснование коэффициента ослабления

При условии слабо замутнённой и оптически однородной атмосферы коэффициенты ослабления и обратного рассеяния можно считать постоянными вдоль трассы зондирования. В таком случае лидарное уравнение, с помощью которого выполняется обработка эхо-сигнала, примет вид:

$$P_i = P_* + \frac{B}{R_i^2} \exp(-2\sigma R_i),$$

где

$B = A \cdot \beta$, A – постоянная лидара,

β - коэффициент обратного рассеяния,

P_* - мощность фонового (солнечного) излучения, рассеянного атмосферой и дошедшего до приёмного устройства,

P_i – мощность сигнала обратного рассеивания,

R_i – расстояние между лидаром и i -м рассеивающим элементом,

σ – коэффициент ослабления.

В данном случае необходимо найти постоянные величины P_* , B , σ с минимальной погрешностью. Наиболее оптимальным решением в данном случае станет применение метода наименьших квадратов. Иначе говоря, значение суммы

$$\delta^2 = \sum_1^n \left(P_* + \frac{B}{R_i^2} \exp(-2\sigma R_i) - P_i \right)^2. \quad \text{должно быть минимальным.}$$

Перед дальнейшими математическими преобразованиями примем, что $\tilde{\sigma}$ – первичное значение коэффициента ослабления (предварительное), $\Delta\sigma$ – погрешность в вычислении данного коэффициента.

Далее, линеаризуем лидарное уравнение:

$$\delta^2 = \sum_1^n \left(P_* + \frac{B}{R_i^2} \exp(-2\tilde{\sigma} R_i) (1 - 2\Delta\sigma R_i) - P_i \right)^2,$$

Для минимизации суммы найдём частные производные функции δ^2 по величинам P_* , B , σ и приравняем к нулю:

$$\sum_1^n (\Delta P_i) = 0,$$

$$\sum_1^n (\Delta P_i) \frac{1}{R_i^2} \exp(-2\tilde{\sigma} R_i) = 0,$$

$$\sum_1^n (\Delta P_i) \frac{1}{R_i} \exp(-2\tilde{\sigma} R_i) = 0,$$

где

$$\Delta P_i = P_* + \frac{B}{R_i^2} \exp(-2\tilde{\sigma} R_i) + \frac{G}{R_i} \exp(-2\tilde{\sigma} R_i) - P_i$$

$$G = -2\Delta\sigma B,$$

Задача сводится к нахождению трёх неизвестных величин в ходе решения системы трёх линейных уравнений. Для удобства запишем решения в виде:

$$\sigma = \Delta\sigma + \tilde{\sigma}, \quad \Delta\sigma = -\Delta_2 / 2\Delta_1,$$

величины Δ_1 и Δ_2 рассчитываются по формуле определителя матрицы:

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} n & \sum_1^n P_i & \sum_1^n \frac{1}{R_i} \tau_i \\ \sum_1^n \frac{1}{R_i^2} \tau_i & \sum_1^n \frac{P_i}{R_i^2} \tau_i & \sum_1^n \frac{1}{R_i^3} \tau_i^2 \\ \sum_1^n \frac{1}{R_i} \tau_i & \sum_1^n \frac{P_i}{R_i} \tau_i & \sum_1^n \frac{1}{R_i^2} \tau_i \end{vmatrix},$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} n & \sum_1^n \frac{1}{R_i^2} \tau_i & \sum_1^n P_i \\ \sum_1^n \frac{1}{R_i^2} \tau_i & \sum_1^n \frac{1}{R_i^4} \tau_i^2 & \sum_1^n \frac{P_i}{R_i^2} \tau_i \\ \sum_1^n \frac{1}{R_i} \tau_i & \sum_1^n \frac{1}{R_i^3} \tau_i^2 & \sum_1^n \frac{P_i}{R_i} \tau_i \end{vmatrix},$$

где

$$\tau_i = \exp(-2\sigma R_i).$$

Для того чтобы определить величину солнечной засветки и величину B , применим следующие соотношения:

$$P_* = \Delta_3 / \Delta_0,$$

$$B = \Delta_1 / \Delta_0,$$

где

$$\Delta_0 = \begin{vmatrix} n & \sum_1^n \frac{1}{R_i^2} \tau_i & \sum_1^n \frac{1}{R_i} \tau_i \\ \sum_1^n \frac{1}{R_i^2} \tau_i & \sum_1^n \frac{1}{R_i^4} \tau_i^2 & \sum_1^n \frac{1}{R_i^3} \tau_i^2 \\ \sum_1^n \frac{1}{R_i} \tau_i & \sum_1^n \frac{1}{R_i^3} \tau_i^2 & \sum_1^n \frac{1}{R_i^2} \tau_i^2 \end{vmatrix},$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} \sum_1^n P_i & \sum_1^n \frac{1}{R_i^2} \tau_i & \sum_1^n \frac{1}{R_i} \tau_i \\ \sum_1^n \frac{P_i}{R_i^2} \tau_i & \sum_1^n \frac{1}{R_i^4} \tau_i^2 & \sum_1^n \frac{1}{R_i^3} \tau_i^2 \\ \sum_1^n \frac{P_i}{R_i} \tau_i & \sum_1^n \frac{1}{R_i^3} \tau_i^2 & \sum_1^n \frac{1}{R_i^2} \tau_i^2 \end{vmatrix}.$$

В данном случае по приведённой формуле вычисляем фоновую засветку. Далее, для вычисления коэффициента ослабления вновь обратимся к лидарному уравнению. Для расчёта нужного параметра исключим из равенства неизвестную величину В. Для этого рассмотрим это равенство в двух точках, то есть при двух значениях расстояния и соответствующих значениях интенсивности:

$$P_1 - P_* = (B/R_1^2) * \exp(-2\sigma R_1)$$

$$P_2 - P_* = (B/R_2^2) * \exp(-2\sigma R_2)$$

Разделим одно уравнение на другое и получим:

$$(P_1 - P_*) / (P_2 - P_*) = (B/R_1^2) * (R_2^2/B) * (\exp(-2\sigma R_1)) / (\exp(-2\sigma R_2))$$

После сокращения дроби на величину В и несложных математических преобразований мы получим формулу:

$$(P_1 - P_*) / (P_2 - P_*) * (R_1^2 / R_2^2) = \exp(2\sigma(R_2 - R_1)).$$

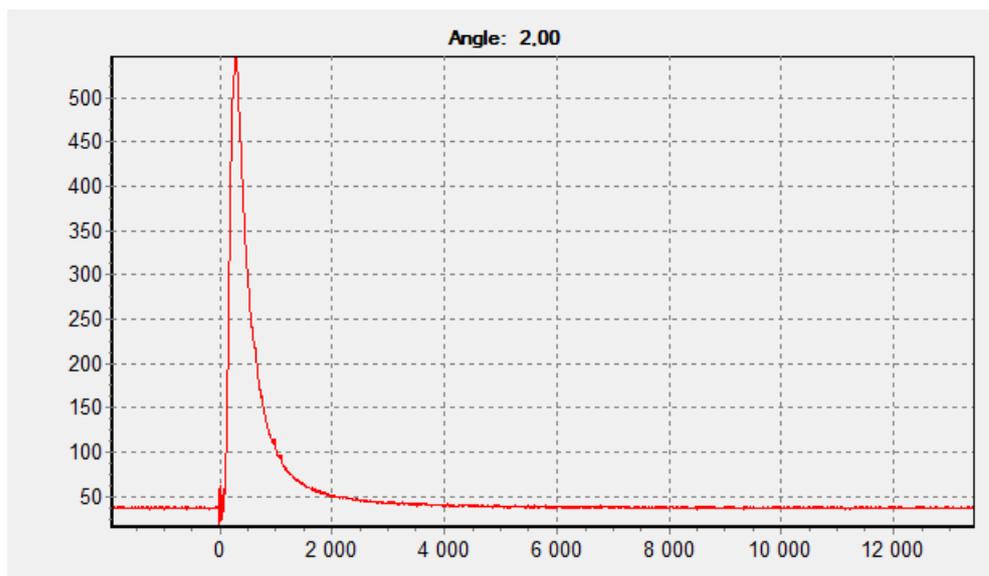
Прологарифмировав данное уравнение, несложно выразить величину σ :

$$\sigma = -\ln((P_1 - P_*) / (P_2 - P_*) * (R_1^2 / R_2^2)) / (2 * (R_2 - R_1)).$$

С помощью этой формулы несложно сосчитать значение коэффициента ослабления, зная предварительное значение этого коэффициента, расстояние и интенсивность сигнала.

Результаты эксперимента

На рисунке снизу представлен эхо-сигнал, полученный в ходе эксперимента.



До нулевого расстояния измерялась фоновая засветка, после чего было произведено испускание лидаром лазерного луча и получен эхо-сигнал до расстояния около 13 км.

В вышеупомянутом эксперименте было проведено несколько измерений под разными углами к горизонту. Было получено несколько различных сигналов. В результате обработки первого сигнала наблюдается достаточно сложная зависимость значения коэффициента ослабления от расстояния. При этом наблюдаются сильные осцилляции.

Обработка результатов измерений

Без учёта фоновой засветки

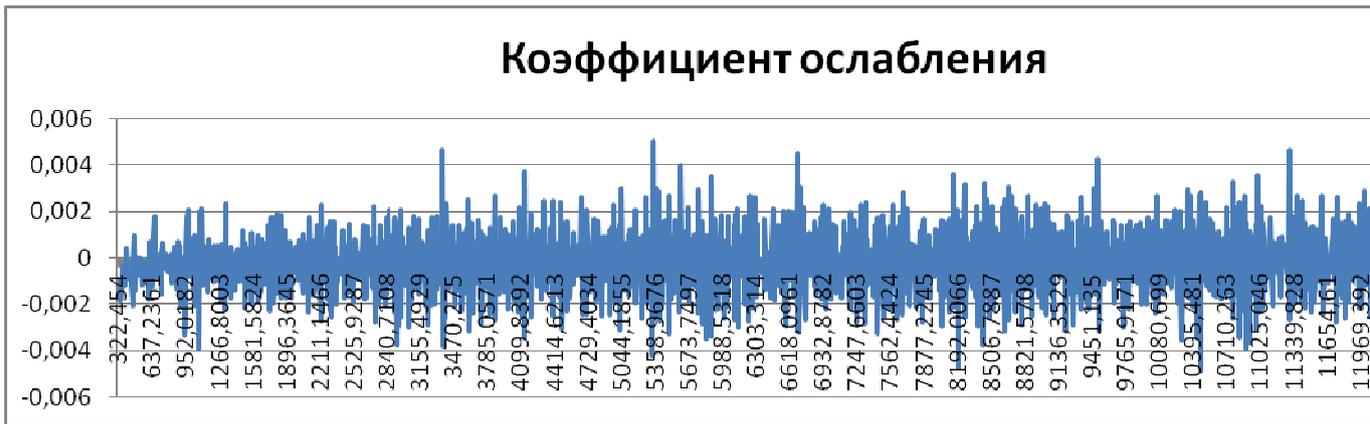
При обработке данных вначале произведём расчёт при отсутствии фоновой засветки. В таком случае, определение коэффициента ослабления произведём по формуле:

$$P_i = \frac{B}{R_i^2} \exp(-2\sigma R_i)$$

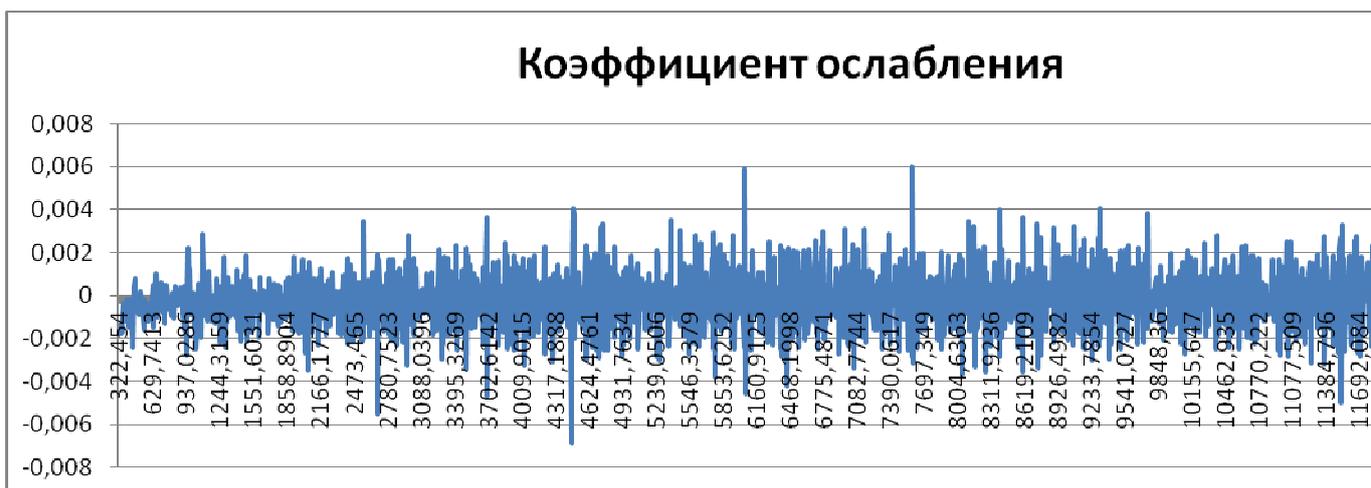
В таком случае, имеем следующий вид зависимости интенсивности эхо-сигнала от расстояния в случае испускания лазерного луча под тремя различными углами к горизонту:



$$\sigma = (-0,000184 \pm 0,000002)$$



$$\sigma = (-0,000184 \pm 0,000002)$$



$$\sigma = (-0,000187 \pm 0,000002)$$

Как видно из графиков, угол наклона лазерного луча практически не влияет на распределение величины коэффициента ослабления. При этом, во всех трёх случаях наблюдаются отрицательные значения коэффициента, что не соответствует реальности. Такие значения объясняются сбоями в работе приёмного оборудования, что подтверждается наличием локального максимума перед испусканием лазерного луча, а также приёмом сигнала, в котором присутствует непосредственно полезный сигнал и фоновая засветка, вызванная солнечным излучением. В тех случаях, когда интенсивность солнечного излучения превышает интенсивность отражённого сигнала, наблюдается отрицательное значение коэффициента ослабления. Для исключения отрицательных значений этой величины включим в формулу фоновую засветку.

С учётом фоновой засветки

Проанализируем данные с учётом фоновой засветки. В таком случае, лидарное уравнение примет вид:

$$P_i = P_* + \frac{B}{R_i^2} \exp(-2\sigma R_i)$$

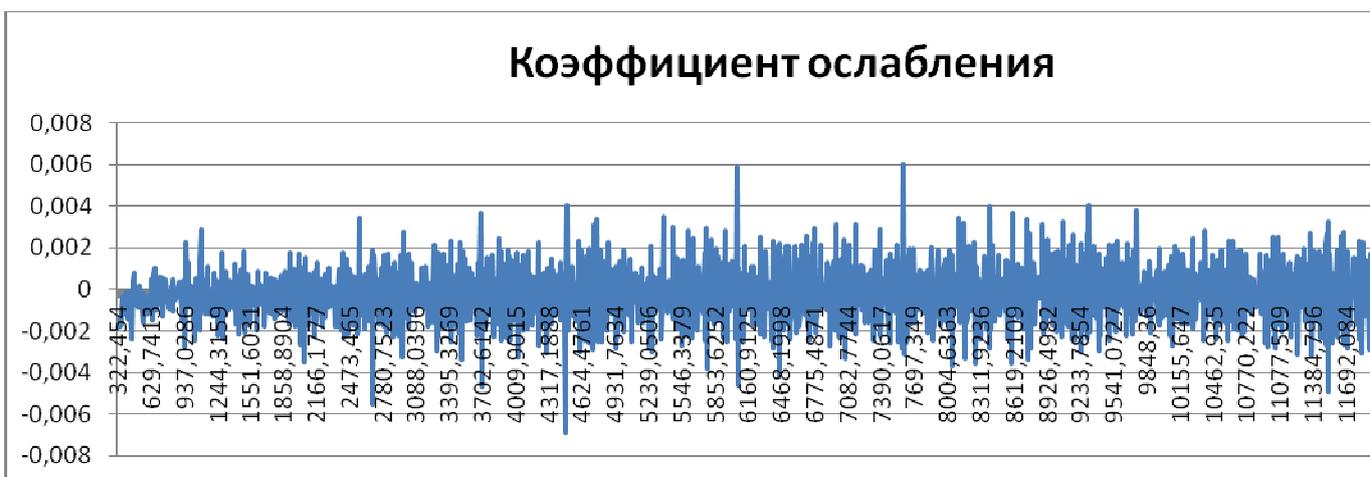
При таком условии, получаем следующие графики зависимости коэффициента ослабления от расстояния:



$$\sigma = (-0,00010 \pm 0,00001)$$



$$\sigma = (-0,00011 \pm 0,00001)$$



$$\sigma = (-0,00011 \pm 0,00001)$$

Как видно из представленных графиков, даже при учёте фоновой засветки присутствуют отрицательные значения коэффициента ослабления. Это происходит из-за малой мощности сигнала, вследствие чего интенсивность солнечного излучения превышает интенсивность полезного сигнала, а также из-за сбоя в работе приёмного оборудования.

Заключение

При проведении исследования были обработаны сигналы при различном значении угла испускания лазерного излучения. При этом расчёты показали, что, несмотря на сильные осцилляции величины коэффициента ослабления, точность предложенного метода достаточно высока, погрешность составляет $\sim 0,1\sigma$ ($1 \cdot 10^{-5}$).

В ходе исследования удалось заметить, что фоновая засветка оказывает существенное влияние на значение коэффициента ослабления σ . Разница величин среднего коэффициента ослабления с учётом P^* и без учёта этой характеристики составляет 0,00008. Это влияние наиболее велико при больших расстояниях, начиная от приблизительно 4600 м. Также, можно заметить, что собственно значение эхо-сигнала становится пренебрежимо малым по сравнению с величиной засветки, вследствие чего задача становится некорректной.

Вывод

При вычислении коэффициента ослабления для слабо замутнённой атмосферы вышеприведённым методом выявились затруднения в определении коэффициента, что связано со слабой мощностью эхо-сигнала на больших расстояниях, начиная с приблизительно 4600 м. В связи с этим есть необходимость в дальнейшем усовершенствовании метода.

Список использованной литературы

1. <https://nsu.ru/xmlui/bitstream/handle/nsu/748/Lecture-2.pdf>
2. <https://www.krugosvet.ru/enc/khimiya/ozon>
3. <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/atmospheric-aerosol#:~:text>
4. https://revolution.allbest.ru/ecology/00569712_0.html
5. <http://www.scert.ru/conferences/cites/2015/presentation/Presentation/School/21.06.15/4-Belan.pdf>
6. <https://ru-ecology.info/term/9549/>
7. <https://www.nkj.ru/archive/articles/5112/>
8. <https://kpfu.ru/portal/docs/F1454596672/Zhukov.G.V..Pogloshhenie.sveta.v.zemnoj.atmosfere.pdf>
9. <http://www.astronet.ru/db/msg/1169494/node28.html>
10. **Ошибка! Недопустимый объект гиперссылки.**
11. В.А. Новикова, С.В. Варжель «РАССЕЯНИЕ СВЕТА И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В ВОЛОКОННОЙ ОПТИКЕ», Санкт-Петербург, 2019
12. В.Г. Беспрозванных, В.П. Первадчук «НЕЛИНЕЙНАЯ ОПТИКА», Издательство Пермского государственного технического университета 2011
13. В.Е. Зуев, Ю.С. Макушкин, Ю.Н. Пономарёв «Спектроскопия атмосферы», Ленинград, Гидрометиздат, 1987

14. В.Е. Зуев, В.В. Зуев «Дистанционное оптическое зондирование атмосферы», САНКТ-ПЕТЕРБУРГ ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ 1992
15. <https://fb.ru/article/251705/gazovyy-lazer-opisanie-harakteristiki-printsip-deystviya>
16. https://laserportal.ru/content_795
17. <https://www.syl.ru/article/336623/poluprovodnikovyye-lazeryi-vidyi-i-printsip-raboty>
18. Богданкевич О. В., Дарзнец С. А., Елисеев П. Г. «Полупроводниковые лазеры». М., 1976
19. Елисеев П. Г. «Введение в физику инжекционных лазеров». М., 1983
20. Басов Н. Г., Елисеев П. Г., Попов Ю. М. «Полупроводниковые лазеры // Успехи физических наук». 1986. Т. 148. № 1.
21. Б.Г. Цикин, М.И. Перченко «ГЕЛИЙ – НЕОНОВЫЙ ЛАЗЕР Учебное пособие для практикума "Квантовая радиофизика" Часть 1» Саратов, 2011
22. <https://www.manualslib.com/manual/1302140/Cimel-Ce318-N.html?page=62#manual>
23. <https://ikfia.ysn.ru/solnechnyj-fotometr-cimel-ce-318-aeronet/>
24. «Современные лидарные средства дистанционного зондирования атмосферы» А. С. Борейшо¹, А. А. Ким¹, М. А. Коняев¹, В. С. Лугиня¹, А. В. Морозов², А. Е. Орлов²
25. 1 Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, Санкт-Петербург
2 АО «Лазерные системы», Санкт-Петербург
26. «Лазер информ», информационный бюллетень лазерной ассоциации, выпуск № 15-16 (438-439), август, 2010
27. <http://lgrinc.ru/info-gas-ghg.html>
28. http://eridan.obninsk.com/Documents/mwl60_descr_ru.pdf
29. А.Д. Егоров, И.А. Потапова «Решение обратной задачи лидарного зондирования слабо замутненной атмосферы», Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
30. <https://bigenc.ru/physics/text/1837660>
31. <https://spacegid.com/atmosfera-zemli.html#i-3>
32. <https://ria.ru/20130916/963459215.html#:~:text>
33. <https://meteo59.ru/book/sostav-i-stroenie-atmosfery/mezosfera.php>
34. <https://ru1.warbletoncouncil.org/termsfera-14548#:~:text>

35. <https://naturaе.ru/atmosfera-zemli/stroenie-atmosfery/termopauza.html>