

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інформаційних радіотехнологій і технічного захисту інформації  
(повна назва)

Кафедра Радіотехнологій інформаційно-комунікаційних систем  
(повна назва)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

ГЮІК.XXXXXX.001ПЗ  
(позначення документа)

**Аналіз ефективності використання резонансних лідарів  
для атмосферних досліджень та астрономії**  
(тема)

Виконав:

студент II курсу, групи РПСКМ-20-1

Мірошніченко Е.Г.

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 172 Телекомунікації та  
радіотехніка

(код і повна назва спеціальності)

Освітня програма Радіоелектроні пристроїв,  
системи та комплекси

(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Зарудний О.А.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Цопа О.І.

(прізвище, ініціали)

2021 р.

Не містить відомостей заборонених до відкритого публікування.

Студент

Мірошніченко Е.Г.

Керівник

Зарудний О.А.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інформаційних радіо технологій і технічного захисту інформації

Кафедра Радіотехнологій інформаційно-комунікаційних систем

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка  
(код і повна назва)

Освітня програма Радіоелектроні пристрої, системи та комплекси  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 р.

**ЗАВДАННЯ**

**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

студентові Мірошніченко Едуарду Геннадійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Аналіз ефективності використання резонансних лідарів для атмосферних досліджень та астрономії

затверджена наказом університету від 05 листопада \_\_\_\_\_ 2021 р. № 1647Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 5 грудня \_\_\_\_\_ 2021 р.

3. Вихідні дані до роботи виконати аналіз ефективності лідарних систем, що використовують ефект резонансного розсіювання на атомах атмосферної речовини

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі провести огляд структури атмосферного шару Землі, як об'єкта досліджень; зробити аналіз лідарних методів дослідження атмосфери, розглянути особливості побудови та практичного застосування резонансних лідарів та зробити розрахунки їх параметрів

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) \_\_\_\_\_

Слайди презентації

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1 )

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата
Основна частина	доц. Зарудний О.А.		

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Ознайомлення зі завданням. Уточнення ТЗ	01.09.2021	вик.
2	Підбір літератури за темою роботи	14.09.2021-23.09.2021	вик.
3	Перший та другий розділ	24.09.2021-10.10.2021	вик.
4	Третій	11.10.2021-25.10.2021	вик.
5	Оформлення презентаційного матеріалу, підготовка до захисту у ЕК	26.10.2021-1.12.2021	вик.

Дата видачі завдання   1   вересня 2021 р.

Студент \_\_\_\_\_ Мірошніченко Е.Г.  
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ доц. Зарудний О.А.  
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Магістерська кваліфікаційна робота складається з пояснювальної записки, котра містить: 79 сторінок тексту, 15 рисунків, 1 таблиця, 26 джерел та 2 додатка

### ФЛУОРЕСЦЕНЦІЯ, ЛІДАР, РОЗСІЮВАННЯ, ЛАЗЕР, ЗОНДУВАННЯ

В роботі аналізуються можливості методу і радіоелектронної (лазерної) апаратури резонансної локації домішок мезосфери та розглянуто можливості лазерного дистанційного зондування на основі лідарів, як ефективного методу дослідження навколишнього середовища. Викладено принципи побудови систем лідарного моніторингу та типи роботи лазерних далекомірів. Проведено аналіз систем лідарного зондування атмосферного середовища.

Описується можливість дистанційного зондування атмосфери за допомогою лідара, що дозволяє отримувати коефіцієнти зворотного розсіювання в діапазоні довжин хвиль від 355 до 1064 нм. Оцінюються параметри лідара для моніторингу аерозолі в висотному діапазоні 70-100 км.

Робота присвячена спеціальним питанням дистанційного дослідження атмосфери за допомогою резонансного лідара на основі ефекту резонансної флуоресценції на атомах натрію у верхній атмосфері.

## ABSTRACT

The master's degree work consists of an explanatory note containing: 79 pages of text, 15 figures, 1 table, 26 sources and 2 appendices.

### FLUORESCENCE, LIDAR, DIFFUSION, LASER, SENSING

The paper analyzes the capabilities of the method and radio-electronic (laser) equipment for resonant location of mesospheric impurities and considers the possibilities of laser remote sensing based on lidar as an effective method for studying the environment. The principles of constructing lidar monitoring systems and the types of operation of laser range finders are outlined. The analysis of lidar sounding systems of the atmospheric environment is carried out.

The possibility of remote sensing of the atmosphere using a lidar is described, which makes it possible to obtain aerosol backscattering and extinction coefficients in the wavelength range from 355 to 1064 nm. Parameters of a multi-wave lidar for aerosol monitoring in an altitude range of 1-10 km are estimated.

The work is devoted to special issues of remote sensing of the atmosphere using a resonant lidar based on the effect of resonant fluorescence in sodium vapor.

## ЗМІСТ

	С.
Вступ .....	7
1 Атмосфера землі як основний об'єкт дистанційного зондування .....	9
1.1 Загальна характеристика атмосфери Землі .....	9
1.2 Значення атмосфери для життя .....	9
1.3 Склад атмосфери.....	10
1.4 Енергообмін в атмосфері .....	11
1.5 Структура атмосферного шару. Тропосфера .....	13
1.6 Стратосфера.....	15
1.7 Наслідки промислового забруднення довкілля .....	18
2 Огляд лідарних методів дослідження атмосфери.....	20
2.1 Оптичні явища, які використовуються при екологічних дослідженнях.....	20
2.2 Лідари та методи лазерного дистанційного зондування .....	22
2.3 Основні напрямки використання лідарів .....	24
2.4 Принципова схема лідару .....	25
2.5 Схеми лазерного зондування атмосфери .....	28
2.6 Аналіз можливостей лідарних методів дослідження атмосфери.....	31
2.6.1 Аналіз хвильових процесів в атмосфері.....	35
2.7 Лідарне рівняння .....	36
3 Особливості побудови резонансних лідарів .....	39
3.1 Типова структурна схема резонансного лідару .....	39
3.2 Лідарне рівняння для методу резонансного зондування .....	41
3.2 Джерела помилок вимірювання енергії лідарного сигналу в режимі лі- чення фотонів .....	43
4 Межі застосування резонансного методу досліджень Та розрахунки грани- чних параметрів.....	47
4.1 Характеристика та природа домішкових шарів у верхній атмосфері. Стан досліджень.....	47
4.2 Гранично допустимі значення енергії випромінювання передавача .....	51
4.3 Резонансні лідари в адаптивних оптичних системах .....	56
4.4 Аналіз граничних енергетичних характеристик резонансного лідару для створення штучної «коригуючої зірки» .....	62
Висновки .....	67
Перелік джерел посилання.....	68

Додатки .....	70
Додаток А. Слайди презентації .....	71
Додаток Б Відомість кваліфікаційної роботи .....	78



## ВСТУП

В останні десятиліття швидко розвивається техніка дослідження атмосфери лідарними методами, заснованими на взаємодії випромінювання оптичного діапазону з повітряним середовищем, які дозволяють зробити висновок про властивості атмосфери. Використання хвиль оптичного діапазону дає можливість створити малогабаритну приймально-передавальну апаратуру лазерного локатора в порівнянні з аналогічною радіотехнічною апаратурою, що важливо, наприклад, при створенні бортових лідарів.

Одним з найбільш перспективних методів дослідження верхньої атмосфери є лідар, який використовує ефект резонансного розсіювання оптичного випромінювання на атомах лужних металів і, зокрема, на атомах натрію. При цьому відкриваються принципово нові можливості визначення складу та динаміки верхніх шарів атмосфери, у тому числі збуджених та заряджених компонентів іоносфери. Останнє особливо важливо для дослідження аерономічних процесів, знання яких необхідне для побудови детальних моделей верхньої атмосфери.

Незважаючи на те, що лужні шари верхньої атмосфери досить давно вивчаються, інтерес до їхніх досліджень не слабшає також і тому що вони є відмінним трасерами хвильових рухів. Атмосферні припливи, гравітаційні хвилі, і навіть вітрові поля істотно впливають на структуру цих шарів [1-3]. В області прикладної астрономії запропоновано використовувати лідарні системи на резонансній флуоресценції натрію (РФН) для створення штучних "коректуючих зірок", які можуть використовуватися адаптерними наземними телескопами з метою компенсації спотворень зображення, обумовлених атмосферною турбулентністю [4].

Метою кваліфікаційної магістерської роботи є аналіз сучасного розвитку лідарних технологій, що базуються на резонансному розсіюванні випромінювання та оцінка ефективності їх використання.

У зв'язку з цим у роботі вирішувались наступні завдання:

- огляд технологій моніторингу навколишнього середовища;

- аналіз сучасного стану розвитку розвитку лідарних технологій досліджень атмосфери;
- особливості побудови резонансних лідарів та розрахунки граничних параметрів.

# 1 АТМОСФЕРА ЗЕМЛІ, ЯК ОСНОВНИЙ ОБ'ЄКТ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ

## 1.1 Загальна характеристика атмосфери Землі

Поки ракети-зонди та штучні супутники не досліджували зовнішні шари атмосфери на відстанях, що в кілька разів перевершують радіус Землі, вважалося, що в міру віддалення від земної поверхні атмосфера поступово стає більш розрідженою і плавно переходить у міжпланетний простір. Наразі встановлено, що потоки енергії з глибоких верств Сонця проникають у космічний простір далеко за орбіту Землі, аж до зовнішніх меж Сонячної системи. Цей так званий сонячний вітер обтікає магнітне поле Землі, формуючи подовжену «порожнину», усередині якої й зосереджена земна атмосфера. Магнітне поле Землі помітно звужено зі зворотної до Сонця денної сторони і утворює довгий язик, який ймовірно виходить за межі орбіти Місяця, – з протилежного, нічного боку. Кордон магнітного поля Землі називається магнітопаузою. З денного боку цей кордон проходить на відстані близько семи земних радіусів від поверхні, але в періоди підвищеної сонячної активності виявляється ще ближче до Землі. Магнітопауза є одночасно межею земної атмосфери, зовнішня оболонка якої називається також магнітосферою, так як в ній зосереджені заряджені частинки (іони), рух яких обумовлено магнітним полем Землі [1]. Загальна вага газів атмосфери становить приблизно  $4,5 \cdot 10^{15}$  т. Таким чином, «вага» атмосфери, що припадає на одиницю площі, або атмосферний тиск, становить на рівні моря приблизно  $11 \text{ т/м}^2$ .

## 1.2 Значення атмосфери для життя

Зі сказаного вище випливає, що Землю від міжпланетного простору відокремлює потужний захисний шар. Космічний простір пронизано потужним ультрафіолетовим та рентгенівським випромінюванням Сонця і ще більш жорстким космічним випромінюванням, і ці види радіації згубні для всього живого. На зовнішній межі атмосфери інтенсивність випромінювання смертоносна, але значна

його частина затримується атмосферою далеко від поверхні Землі. Поглинанням цього випромінювання пояснюються багато властивостей високих шарів атмосфери і особливо електричні явища, що там відбуваються. Найнижчий, приземний шар атмосфери особливо важливий для людини, яка мешкає у місці контакту твердої, рідкої та газоподібної оболонок Землі. Верхня оболонка "твердої" Землі називається літосферою. Близько 72% поверхні Землі покрито водами океанів, що становлять більшу частину гідросфери [1]. Атмосфера межує як із літосферою, так і з гідросферою. Людина живе на дні повітряного океану і поблизу або вище за рівень океану водного. Взаємодія цих океанів одна із важливих чинників, визначаючих стан атмосфери.

### 1.3 Склад атмосфери

Нижні шари атмосфери складаються із суміші газів (див. табл. 1.1) та домішок природного та антропогенного походження [1].

Таблиця 1.1 – Основні складові атмосфери

Молекули	Средня концентрація (об'ємний вміст)
N <sub>2</sub>	0,78084
O <sub>2</sub>	0,20946
H <sub>2</sub> O	$1,3 \cdot 10^{-7} \dots 4,5 \cdot 10^{-2}$
CO <sub>2</sub>	$3,18 \cdot 10^{-4}$ [ $3,3 \cdot 10^{-4}$ ]
CH <sub>4</sub>	$(1 \dots 1,4) \cdot 10^{-6}$ [ $3,3 \cdot 10^{-4}$ ]
H <sub>2</sub>	$5 \cdot 10^{-7}$
CO	$(0,5 \dots 2,5) \cdot 10^{-7}$ [ $0,75 \cdot 10^{-7}$ ]
O <sub>3</sub>	$(2..7) \cdot 10^{-8}$
N <sub>2</sub> O	$(2,7 \dots 3,5) \cdot 10^{-7}$ [ $2,8 \cdot 10^{-7}$ ]
NO	$10^{-8} \dots 10^{-6}$
NO <sub>2</sub>	$10^{-9} \dots 10^{-6}$
HNO <sub>3</sub>	$2,8 \cdot 10^{-9}$
NH <sub>3</sub>	$< 10^{-4}$

Продовження таблиці 1.1

SO <sub>2</sub>	$(0,5...7,2) \cdot 10^{-9}$
H <sub>2</sub> S	$(1,6...16) \cdot 10^{-9}$
HCHO	$<10^{-7}$
HCl	$(1...2,6) \cdot 10^{-9}$
NO <sub>3</sub> , OH, HO <sub>2</sub> , CH <sub>3</sub> O	$5 \cdot 10^{-11}$

У квадратних дужках подано дані з іншого джерела. Там, де вказаний діапазон, дані відповідають різним регіонам, широтам і порам року. У високих проша-рках атмосфери склад повітря змінюється під впливом жорсткого випромінюван-ня Сонця, що призводить до розпаду молекул кисню на атоми. Атомарний кисень є основним компонентом найвищих шарів атмосфери. Нарешті, у найбільш відда-лених від поверхні Землі шарах атмосфери головними компонентами стають най-легші гази - водень і гелій. Оскільки основна маса речовини зосереджена в нижніх 30 км, то зміни складу повітря на висотах понад 100 км не помітно впливають на загальний склад атмосфери.

#### 1.4 Енергообмін в атмосфері

Сонце є основним джерелом енергії, що надходить на Землю. Знаходячись на відстані близько 150 млн. км від Сонця, Земля отримує приблизно одну двомі-льярдну частину випромінюваної ним енергії, головним чином у видимій частині спектра, яку людина називає «світлом» (рис. 1.1). Більшість цієї енергії поглина-ється атмосферою та літосферою. Земля також випромінює енергію, переважно у вигляді довгохвильової інфрачервоної радіації (рис.1.2) [7].

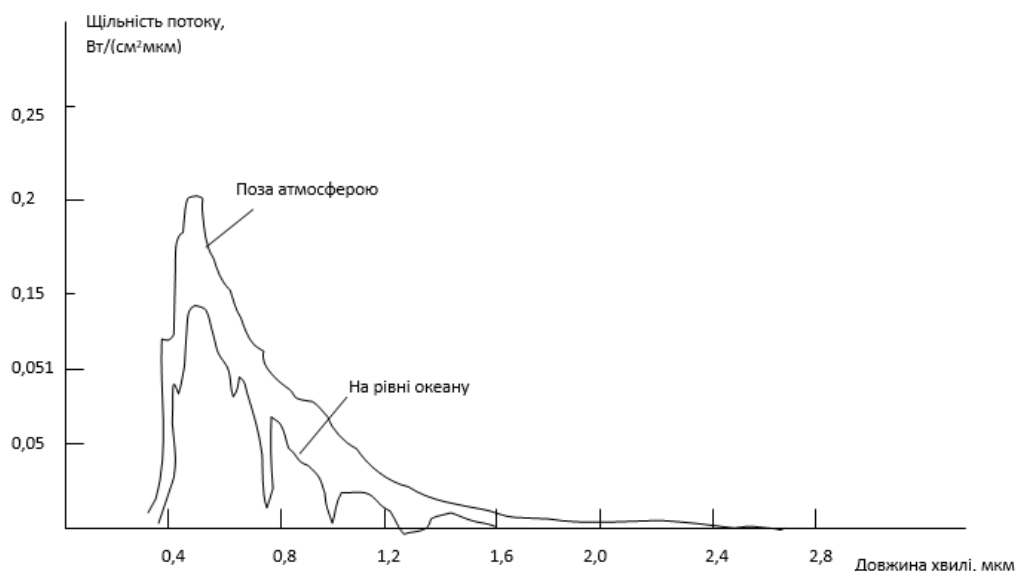


Рисунок 1.1 - Спектральна енергетична щільність потоку прямого сонячного випромінювання до та після проходження через атмосферу

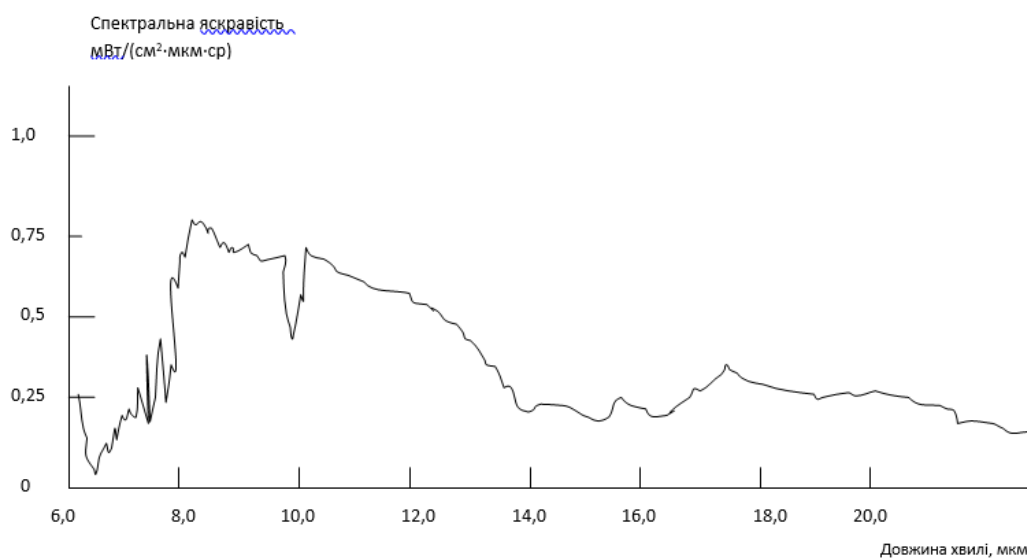


Рисунок 1.2 – Спектр випромінювання Землі

Таким чином, встановлюється рівновага між енергією, що отримується від Сонця, нагріванням Землі та атмосфери і зворотним потоком теплової енергії, що випромінюється в простір. Механізм цієї рівноваги вкрай складний. Пил і молекули газів розсіюють світло, частково відбиваючи їх у світовий простір. Ще більшу частину радіації, що приходить, відображають хмари. Частина енергії поглинається безпосередньо молекулами газів, але в основному гірськими породами, рос-

линністю та поверхневими водами. Водяна пара і вуглекислий газ, присутні в атмосфері, пропускають видиме випромінювання, але поглинають інфрачервоне. Теплова енергія накопичується головним чином в нижніх шарах атмосфери. Подібний ефект виникає в теплиці, коли скло пропускає світло всередину і ґрунт нагрівається. Оскільки скло відносно непрозоре для інфрачервоної радіації, у парнику акумулюється тепло. Нагрів нижніх шарів атмосфери за рахунок присутності водяної пари та вуглекислого газу часто називають парниковим ефектом. Істотну роль в збереженні тепла в нижніх шарах атмосфери грає хмарність. Якщо хмари розсіюються або зростає прозорість повітряних мас, температура неминуче знижується в міру того, як поверхня Землі безперешкодно випромінює теплову енергію в навколишній простір. Вода, що знаходиться на поверхні Землі, поглинає сонячну енергію і випаровується, перетворюючись на газ - водяну пару, яка виносить величезну кількість енергії в нижні шари атмосфери. При конденсації водяної пари і утворенні при цьому хмар або туману ця енергія звільняється у вигляді тепла. Близько половини сонячної енергії, що досягає земної поверхні, витрачається на випаровування води і надходить у нижні шари атмосфери. Таким чином, внаслідок парникового ефекту та випаровування води атмосфера прогрівається знизу. Цим частково пояснюється висока активність її циркуляції в порівнянні з циркуляцією Світового океану, який прогрівається тільки зверху і тому значно стабільніший за атмосферу. Крім загального нагрівання атмосфери сонячним світлом, значне прогрівання деяких її шарів відбувається за рахунок ультрафіолетового та рентгенівського випромінювання Сонця.

### 1.5 Структура атмосферного шару. Тропосфера [1]

Порівняно з рідинами та твердими тілами, у газоподібних речовинах сила тяжіння між молекулами мінімальна. У міру збільшення відстані між молекулами газу здатні розширюватися безмежно, якщо їм ніщо не перешкоджає. Нижнім кордоном атмосфери є Земля. Строго кажучи, цей бар'єр не непроникний, оскільки газообмін відбувається між повітрям і водою і навіть між повітрям і гірськими породами, але в цьому випадку цими факторами можна знехтувати. Оскільки ат-

мосфера є сферичною оболонкою, вона не має бічних кордонів, а є лише нижня межа і верхня (зовнішня) межа, відкрита з боку міжпланетного простору. Через зовнішню межу відбувається витік деяких нейтральних газів, а також надходження речовини з навколишнього космічного простору. Більшість заряджених частинок, крім космічних променів, які мають високу енергію, або захоплюються магнітосферою, або відштовхуються нею. На атмосферу діє також сила земного тяжіння, яка утримує повітряну оболонку біля Землі. Атмосферні гази стискаються під впливом своєї ваги. Це стиснення максимально біля нижньої межі атмосфери, тому й густина повітря тут найбільша. На будь-якій висоті над земною поверхнею тиск повітря дорівнює вазі вищого стовпа атмосфери, що припадає на одиницю площі. Тому з висотою тиск монотонно зменшується; а оскільки воно знаходиться в прямому зв'язку із щільністю, то і щільність повітря зменшується з висотою. Якби атмосфера являла собою «ідеальний газ» з незалежним від висоти постійним складом, незмінною температурою і на неї діяла б постійна сила тяжіння, то тиск зменшувався б в 10 разів на кожні 20 км висоти. Реальна атмосфера трохи відрізняється від ідеального газу приблизно до висоти 100 км, а потім тиск з висотою зменшується повільніше, так як змінюється склад повітря. Невеликі зміни в описану модель вносять і зменшення сили тяжіння в міру віддалення від центру Землі, що становить поблизу земної поверхні близько 3% на кожні 100 км висоти. На відміну від атмосферного тиску, температура з висотою не знижується безперервно. Це відбувається при поглинанні сонячної ультрафіолетової радіації киснем. При цьому утворюється озон газ, молекули якого складаються з трьох атомів кисню (O<sub>3</sub>). Він теж поглинає ультрафіолетове випромінювання, і тому цей шар атмосфери, званий озоносферою, нагрівається. Вище температура знову знижується, тому що там набагато менше молекул газу, і, відповідно, скорочується поглинання енергії. У ще вищих шарах температура знову підвищується внаслідок поглинання атмосферою найбільш короткохвильового ультрафіолетового та рентгеновського випромінювання Сонця. Під впливом цього випромінювання відбувається іонізація атмосфери, тобто. молекула газу втрачає електрон і набуває позитивного електричного заряду. Такі молекули стають позитивно зарядженими іонами. За-



вдяки наявності вільних електронів та іонів цей шар атмосфери набуває властивостей електропровідника. Вважають, що температура продовжує підвищуватися до висот, де розріджена атмосфера переходить у міжпланетний простір. На відстані кількох тисяч кілометрів від поверхні Землі, ймовірно, переважають температури від  $5000^{\circ}$  до  $10\,000^{\circ}$  С. Хоча молекули та атоми мають дуже великі швидкості руху, а, отже, і високу температуру, цей розріджений газ не є «гарячим» у звичному сенсі. Через мізерну кількість молекул на великих висотах їх сумарна теплова енергія дуже невелика. Таким чином, атмосфера складається з окремих шарів (тобто серії концентричних оболонок, або сфер), виділення яких залежить від того, яка властивість становить найбільший інтерес. Тропосфера - нижній шар атмосфери, що тягнеться до першого термічного мінімуму (так званої тропопаузи). Верхня межа тропосфери залежить від географічної широти (у тропіках – 18–20 км, у помірних широтах – близько 10 км) та пори року. Саме в тропосфері переважно формується погода, яка визначає умови існування людини. Більша частина атмосферного водяної пари зосереджена в тропосфері, і тому тут головним чином і формуються хмари, хоча деякі з них, що складаються з крижаних кристалів, зустрічаються і в більш високих шарах. Для тропосфери характерні турбулентність та потужні повітряні течії (вітри) та шторми. У верхній тропосфері існують сильні повітряні течії строго певного напрямку. Турбулентні вихори, подібні до невеликих вир, утворюються під впливом тертя і динамічної взаємодії між повільно і швидко рухомими повітряними масами. Оскільки в цих високих прошарках хмарності зазвичай немає, таку турбулентність називають «турбулентністю ясного неба».

## 1.6 Стратосфера [1]

Вищележачий шар атмосфери часто помилково описують як шар з порівняно постійними температурами, де вітри дмуть більш менш стійко і де метеорологічні елементи мало змінюються. Верхні шари стратосфери нагріваються при поглинанні киснем та озоном сонячного ультрафіолетового випромінювання. Верхня межа стратосфери (стратопауза) проводиться там, де температура трохи підвищу-

ється, досягаючи проміжного максимуму, який нерідко зіставимий з температурою приземного шару повітря (рис.1.3) [1], [22]. . На основі спостережень, проведених за допомогою літаків і куль-зондів, пристосованих для польотів на постійній висоті, в стратосфері встановлені турбулентні обурення і сильні вітри, що дмуть у різних напрямках. Як і в тропосфері, відзначаються потужні повітряні вихори, які є особливо небезпечними для високошвидкісних літальних апаратів. Сильні вітри, які називають струминними течіями, дмуть у вузьких зонах уздовж кордонів помірних широт, звернених до полюсів. Однак ці зони можуть зміщуватися, зникати та з'являтися знову. Струменеві течії зазвичай проникають у тропопаузу і виявляються у верхніх шарах тропосфери, але їх швидкість швидко зменшується зі зниженням висоти. Можливо, частина енергії, що надходить у стратосферу (головним чином витрачається на утворення озону), впливає на процеси в тропосфері. Особливо активне перемішування пов'язане з атмосферними фронтами, де великі потоки стратосферного повітря були зареєстровані істотно нижче тропопаузи, а тропосферне повітря залучалося в нижні шари стратосфери. Значних успіхів було досягнуто у вивченні вертикальної структури нижніх шарів атмосфери у зв'язку з удосконаленням техніки запуску на висоті 25–30 км радіозондів. Мезосфера, що знаходиться вище стратосфери, є оболонкою, в якій до висоти 80–85 км відбувається зниження температури до мінімальних показників для атмосфери в цілому. Верхня межа мезосфери (мезопауза) приблизно збігається з нижньою межею області активного поглинання рентгенівського та найбільш короткохвильового ультрафіолетового випромінювання Сонця, що супроводжується нагріванням та іонізацією газу. У полярних регіонах влітку в мезопаузі часто з'являються хмарні системи, які займають велику площу, але мають незначний вертикальний розвиток. Такі хмари, що світяться ночами, часто дозволяють виявляти великомасштабні хвилеподібні рухи повітря в мезосфері. Склад цих хмар, джерела вологи та ядер конденсації, динаміка та зв'язок з метеорологічними факторами поки що недостатньо вивчені. Термосфера є шаром атмосфери, в якому безперервно підвищується температура. Його потужність може досягати 600 км. Тиск і, отже, густина газу з висотою постійно зменшуються. Поблизу земної поверхні 1

$\text{м}^3$  повітря міститься близько  $2,5 \cdot 10^{25}$  молекул, на висоті близько 100 км, у нижніх шарах термосфери, – приблизно  $10^{19}$ , на висоті 200 км, в іоносфері –  $5 \cdot 10^{15}$  і, за розрахунками, на висоті близько 850 км – приблизно  $10^{12}$  молекул. У міжпланетному просторі концентрація молекул становить  $10^8$ – $10^9$  на  $1 \text{ м}^3$ . На висоті близько 100 км кількість молекул невелика і вони рідко стикаються між собою. Середня відстань, яку подолає хаотично рухома молекула до зіткнення з іншою такою ж молекулою, називається її середнім вільним пробігом. Шар, в якому ця величина настільки збільшується, що ймовірністю міжмолекулярних або міжатомних зіткнень можна знехтувати, знаходиться на межі між термосферою і вищою оболонкою (екзосферою) і називається термопаузою. Термопауза віддалена від земної поверхні приблизно на 650 км. При певній температурі швидкість руху молекули залежить від її маси: легші молекули рухаються швидше за важкі. У нижній атмосфері, де вільний пробіг дуже короткий, не спостерігається помітного поділу газів за їх молекулярною вагою, але воно виражено вище 100 км. Крім того, під впливом ультрафіолетового та рентгенівського випромінювання Сонця молекули кисню розпадаються на атоми, маса яких становить половину маси молекули. Тому в міру віддалення від поверхні Землі атомарний кисень набуває все більшого значення у складі атмосфери і на висоті близько 200 км стає її головним компонентом. Вище, приблизно з відривом 1200 км від Землі, переважають легкі гази – гелій і водень. З них складається зовнішня оболонка атмосфери. Такий поділ за вагою, званий дифузним розшаруванням, нагадує поділ сумішей за допомогою центрифуги. Екзосферою називається зовнішній шар атмосфери, що виділяється на основі змін температури та властивостей нейтрального газу. Молекули та атоми в екзосфері обертаються навколо Землі за балістичними орбітами під впливом сили тяжіння. Деякі з цих орбіт є параболічні і схожі на траєкторії металевих снарядів. Молекули можуть обертатися навколо Землі і по еліптичних орбітах, як супутники. Деякі молекули, переважно водню і гелію, мають розімкнені траєкторії і йдуть у космічний простір.

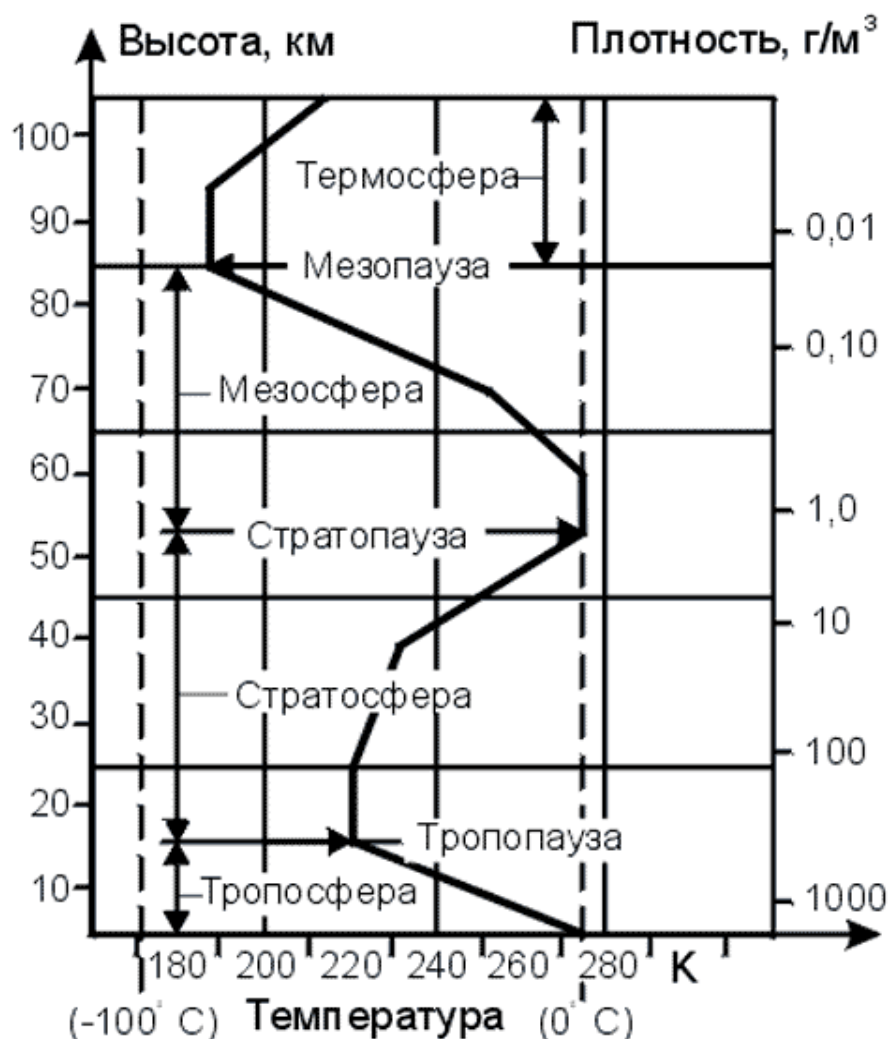


Рисунок 1.3 – Модель висотного розподілу температури та щільності атмосфери

### 1.7 Наслідки промислового забруднення довкілля

Неухильне зростання надходжень токсичних речовин у довкілля, насамперед, відбивається на здоров'ї населення, погіршується якість продукції сільського господарства, знижується врожайність, передчасно руйнується житло, металоконструкції промислових і цивільних споруд, вплив на клімат окремих регіонів та стан озонового шару землі, що призводить до загибелі флори і фауни.

Оксиди вуглецю, сірки, азоту, вуглеводню-роду, сполуки свинцю, пил і т.д. мають різний токсичний вплив на організм людини. Наведемо властивості деяких домішок [1].

Оксид вуглецю CO. Безбарвний газ, що не має запаху, впливає на нервову та серцево-судинну систему, викликає задуху. Первинні симптоми отруєння оксидом вуглецю (появи головного болю) виникає у людини через 2-3 години його перебування в атмосфері, що містить 200-220 мг/м³ CO; при більш високих концентраці-

ях CO з'являється відчуття пульсу у скронях, запаморочення. Токсичність CO зростає за наявності у повітрі оксидів азоту, у разі концентрації CO у повітрі необхідно знижувати  $\sim 1,5$  разу.

Оксид азоту NOx (NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, NO<sub>5</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>). В атмосферу викидається в основному діоксид азоту NO<sub>2</sub> - безбарвний отруйний газ, що не має запаху, дратівливо діє на органи дихання. Особливо небезпечний оксид азоту в горах, де вони, впливаючи з вуглеводнями вихлопних газів утворюють фотохімічний туман - смог. Отруйна дія оксидів азоту починається з легкого кашлю. При підвищенні концентрації NOx виникає сильний кашель, блювання, іноді головний біль. При контакті з вологою поверхнею слизової оболонки оксиди азоту утворюють кислоти HNO<sub>3</sub> і HNO<sub>2</sub>, які призводять до набряку легень.

Діоксид сірки SO<sub>2</sub>. Безбарвний газ із гострим запахом, вже у малих концентраціях (20-30 мг/м<sup>3</sup>) створює неприємний смак у роті, дратує слизові оболонки очей та дихальні шляхи. Найбільш чутливі до SO<sub>2</sub> хвойні та листяні ліси, оскільки він накопичується в листі та хвої. При вмісті SO<sub>2</sub> у повітрі від 0,23 до 0,32 мг/м<sup>3</sup> відбувається усихання сосни за 2 роки внаслідок порушення фотосинтезу та дихання хвої. Аналогічні зміни листяних дерев виникають при концентрації SO<sub>2</sub> 0,5 - 1,0 мг/м<sup>3</sup>.

Вуглеводні (пари бензину, пентан, гексан та ін). Має наркотичну дію, у малих концентраціях викликають головний біль, запаморочення тощо. Так, при вдиханні протягом 8 ч. парів бензину  $\sim 600$  мг / м<sup>3</sup> виникають головні болі, кашель неприємне відчуття в горлі.

Альдегіди. При тривалому впливі на людину альдегіди викликають подразнення слизових оболонок очей та дихальних шляхів, а при підвищених концентраціях (для формальдегіду 20-70 мг/м<sup>3</sup>) відзначається головний біль, слабкість, втрата апетиту, безсоння.

З'єднання свинцю. В організм через органи дихання надходить  $\sim 50\%$  сполук свинцю. Під дією свинцю порушується синтез гемоглобіну, виникають захворювання дихальних шляхів, сечостатевої системи, нервової системи. Особливо небезпечні з'єднання свинцю для дітей дошкільного віку. У великих містах вміст свинцю в атмосфері досягає 5-38 мкг/м<sup>3</sup>, що перевищує природне тло в 10<sup>4</sup> разів.

## 2 ОГЛЯД ЛІДАРНИХ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ АТМОСФЕРИ

### 2.1 Оптичні явища, які використовуються при екологічних дослідженнях

Відбиті сигнали використовуються в дальнометрії, батиметрії (вимірювання глибини), системах, що сканують, для отримання об'ємної топограми об'єкта, в картографічних системах зображення (рівень відбитого сигналу визначається коефіцієнтом відображення поверхні, що дозволяє отримати напівтонове зображення підстилаючої поверхні з невисоким дозволом - контури річок, лісів, засніжених гір та ін.). Відбиття має місце завжди, але у поєднанні з розсіянням, так як поверхні зазвичай мають випадковим чином орієнтовані нерівності більше довжини хвилі випромінювання. На приймачі далекометрів сканерів і батиметрів надходять одночасно відображені сигнали та розпорошені у зворотному напрямку. Відбиті сигнали підпорядковуються закону відбиття (кут падіння дорівнює куту відбиття).

Явище зворотне розсіюванню в газоподібних і рідких середовищах використовується найбільш широко (головним чином для виявлення газів і визначення їх концентрації) і заслуговує на більш детальний розгляд. Набір основних явищ, що лежать в основі роботи лідарів для зондування атмосфери та океану, наступний [22]:

- пружне розсіювання на атомах і молекулах без зміни частоти випромінювання (розсіювання Релея);



Рисунок 2.1 – Процес Релеєвського розсіювання атомом

- пружне розсіювання на малих частинках і аерозолях (розміри яких можна порівняти з довжиною хвилі випромінювання) без усунення частоти випромінювання (розсіювання Мі):

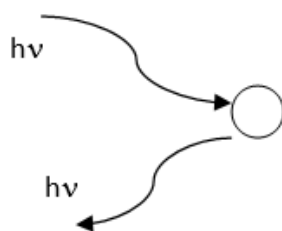


Рисунок 2.2 – Процес розсіювання випромінювання частками атмосфери

- спонтанне комбінаційне розсіювання (СКР) на молекулах зі зрушенням частоти розсіяного випромінювання ( $h\nu - h\nu^* = E$ ), що визначається параметрами молекул (розсіювання Рамана);



Рисунок 2.3 – Процес спонтанного комбінаційного розсіювання випромінювання молекулами

- резонансне розсіювання без усунення частоти (частота зондуєчого випромінювання відповідає атомним переходам середовища; великий перертин взаємодії).

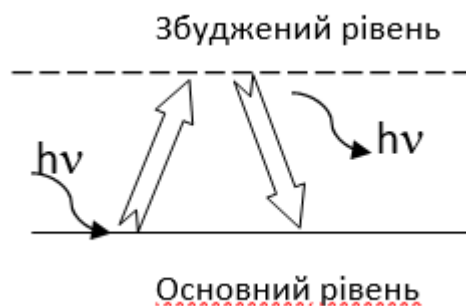


Рисунок 2.4 – Процес резонансного розсіювання випромінювання атомом

Поглинання випромінювання виникає у випадках, коли частота зондуючого випромінювання потрапляє у смугу поглинання молекул досліджуваного середовища. Використовується, наприклад, в газоаналізаторах. Газоаналізатори складаються з двох основних блоків: випромінювача з джерелом з відомим спектром та приймального блоку, що включає приймальний телескоп та спектроаналізатор. Випромінювач та приймальний блок видалені на відстань до десятків метрів. Випромінювання проходить через так звану аналізовану трасу, а приймальний блок дозволяє виявити смуги поглинання на трасі. Газоаналізатори використовуються для інспекції забрудненості повітря над міськими автошляхами, в зоні розміщення хімічних комбінатів та ін.

Ефект Доплера полягає у зміщенні частоти зондуючого випромінювання при відображенні (зворотному розсіюванні) від рухомих мас повітря. На його основі працюють лідари, що вимірюють швидкість та напрямок переміщення повітря.

Явище часткової деполяризації виникає при відображенні лінійно поляризованого світла деяких речовин. Використовується, головним чином, для дослідження хмар (скупчень частинок водяної пари).

Знайшли застосування й іншим явищам: закони ідеального газу (при вимірюваннях температури повітря), розсіяння Бріллюена у водних середовищах (вимірювання температури води) та меншою мірою деякі інші.

## 2.2 Лідари та методи лазерного дистанційного зондування

Оптичне зондування фактично виникло ще до створення лазера. Тим не менш, чудові характеристики навіть перших рубінових лазерів (потужне випромінювання і колімованість світлового пучка) відразу ж зробили їх конкурентоспроможними з прожекторами, що використовувались в той час. Подальший розвиток лазерної техніки, дозволив зменшити тривалість лазерних імпульсів, збільшити потужність випромінювання, зменшити величину розбіжності пучка і т.д., призвело до того, що лазерні системи зайняли важливе місце у сфері дистанційного



зондування. Ці системи отримали назву лідари (від англ. Light identification, detection and ranging).

Лідарні системи або лідари - це лазерні локаційні оптоелектронні системи активного типу, призначені для дистанційного зондування навколишнього середовища лазерним випромінюванням з метою отримання інформації для вирішення наукових, метеорологічних, виробничих та екологічних завдань.

Дія лідарів заснована на таких специфічних властивостях лазерного випромінювання як висока щільність потужності, квазімонохроматичність, спрямованість і мала тривалість імпульсів і таких фізичних процесах як пружне молекулярне і аерозольне розсіювання, непружне резонансне і комбінаційне розсіювання його взаємодії з атомами, молекулами та частинками речовини. Цим фізичним процесам відповідають методи лазерного дистанційного зондування - метод комбінаційного розсіювання, метод індуктивної флуоресценції і т.д. При поширенні зондуючого лазерного випромінювання від передавального пристрою лідара у досліджуваному середовищі утворюється лазерний «слід» за рахунок зазначених фізичних процесів, і виникає вторинне оптичне випромінювання, яке як лазерний локаційний ехо-сигнал надходить на приймальний пристрій, де реєструється за допомогою високочутливого приймача оптичного випромінювання і піддається обробці за певними правилами з метою отримання даних про необхідні параметри досліджуваного середовища.

Дистанційне зондування сьогодні виглядає досить розвиненою областю науки і техніки, тому можна скласти розгалужену класифікацію методів та приладів на основі щонайменше п'яти ознак [22]:

- наявності безпосереднього світлового впливу на середовище,
- досліджуване середовище (досліджуваний об'єкт),
- характер взаємодії з середовищем (оптичні явища),
- місце базування приладів
- загальне призначення приладів.

За наявності дії на досліджуваний об'єкт методи і засоби зондування діляться на пасивні і активні. У пасивних методах використовується відбите від об'єкта сонячне випромінювання. Пасивні прилади формують зображення, наприклад, ділянок земної поверхні, з різною просторовою роздільною здатністю в білому світлі або в різних спектральних діапазонах (телескопи, радіометри - теплове випромінювання), а також аналізують спектральний склад відбитого випромінювання (спектрометри). Спектральний аналіз може здійснюватися традиційними спектральними приладами (на дифракційних ґратах, призмах, інтерференційних фільтрах, еталонах Фабрі-Перо) та за допомогою інтерферометра Майкельсона (фур'є-спектрометрія), в якому за рахунок сканування в одній із гілок інтерферометра (переміщення реєстрація фур'є-спектру випромінювання з подальшим розшифруванням спектру [24].

В якості досліджуваного середовища або об'єкта можуть бути:

- поверхня землі та місяця;
- поверхня океану та морське дно на невеликих глибинах (метри-десятки метрів);
- підповерхневий шар океану та шари на значних глибинах;
- атмосфера;
- поверхня та атмосфера інших планет та їх супутників.

### 2.3 Основні напрямки використання лідарів

Лідари як інструмент дослідження навколишнього середовища є надзвичайно універсальними. Крім того, необхідно відзначити високу швидкість лазерного дослідження, так як лазерне випромінювання поширюється в навколишньому середовищі зі швидкістю світла, і те, що при лазерному зондуванні не відбувається суттєвого збурення досліджуваного середовища. Універсальність лідарів дозволяє використовувати їх для екологічного моніторингу за такими основними напрямками [24]:

- визначення термічних і структурних складових атмосфери Землі і, отже, контроль забруднення атмосфери;
- визначення термічних, структурних та динамічних характеристик атмосфери, гідросфери та підстилаючої поверхні Землі;
- реєстрація порогових концентрацій певних складових, які потрібні в деяких системах аварійного попередження забруднень;
- отримання карт розсіювання шлейфів забруднення та їх еволюції у часі;
- розпізнавання спектральних образів нафтових плям за спектральними характеристиками їх випромінювання.

Лідарні системи можуть встановлюватися як на наземних майданчиках, так і на рухомих засобах: наземному транспорті, судах, вертольотах, літаках чи супутниках.

#### 2.4 Принципова схема лідара [26]

Незважаючи на різноманітність назв систем та приладів для дистанційних вимірювань, вони мають аналогічну структуру та влаштовані за дуже схожими схемами. Розглянемо загальний устрій досліджуваних систем на прикладі лідара. Схему наведено на рис. 2.5. Вона складається з блоку випромінювача, що генерує зонduючий пучок, приймального блоку, а також процесора, що здійснює обробку даних, і засоби відображення інформації (монітора, осцилографа або самописця). У системах пасивного типу відсутній блок випромінювача.

Інтенсивні імпульси зондувального випромінювання генеруються лазером і через оптичну систему, що коліміює, направляються на досліджуваний об'єкт. Якщо розбіжність випромінювання невелика (кутові хвилини), а відстань вимірюється десятками чи сотнями метрів, то додаткова колімація може не знадобитися.

Невелика частина генерованого випромінювання (частки відсотка) відбиваються світлоділником і використовується для формування опорного сигналу (початок відліку).

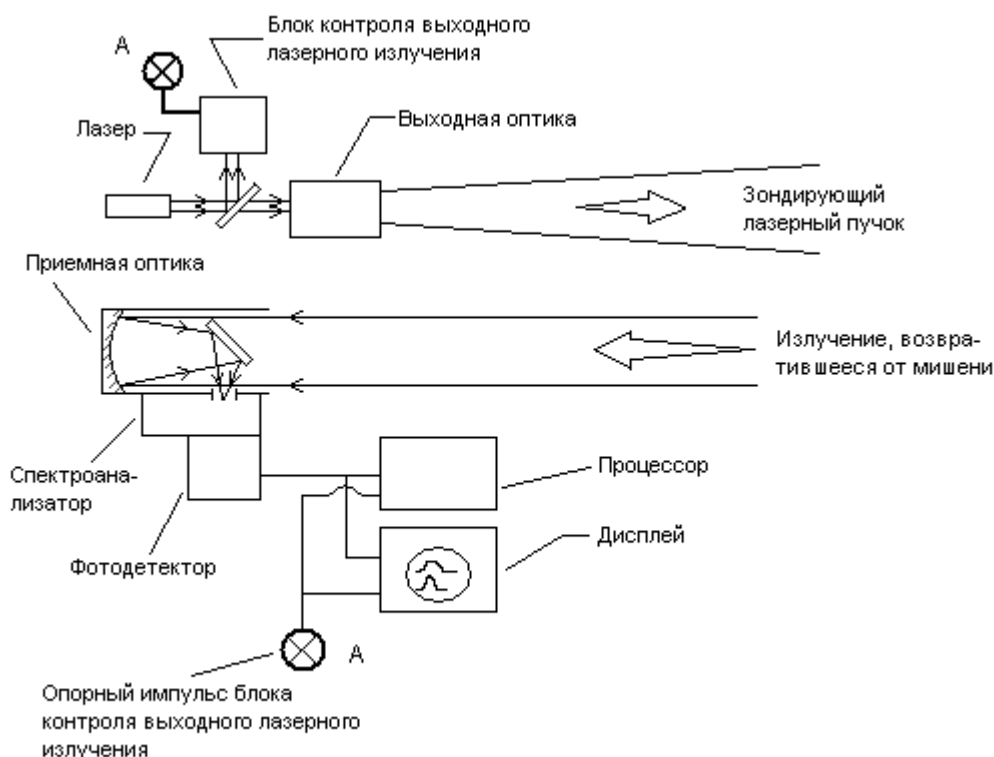


Рис. 2.5 — Структурна схема лідару

Зворотний сигнал з тимчасовою затримкою, що визначається головним чином відстанню до об'єкта, збирається приймальним телескопом і концентрується в межах польової діафрагми приладу. Польова діафрагма обмежує поле зору приймального телескопа з метою забезпечення необхідного просторового дозволу і зменшення шумів, пов'язаних з багаторазовим розсіюванням випромінювання в досліджуваному середовищі. Її розміри визначаються в основному кутовою розбіжністю зондувального пучка. Можуть використовуватися декілька діафрагм різного розміру для вимірювання з різною роздільною здатністю. Далі зворотний імпульс проходить через спектроаналізатор, в якому здійснюється поділ пучків по довжинах хвиль, якщо використовується кілька пучків, і вузькосмугова фільтрація корисних сигналів з метою придушення фону і паразитних пучків. Відфільтрований сигнал потрапляє на чутливу площадку фотоприймача, посилюється, оцифровується і надходить у процесор, де здійснюється обробка інформації з урахуванням опорного сигналу. Для зручності роботи та налаштування приладів використовуються пристрої відображення інформації.

Кожен елемент схеми вимагає окремого докладного розгляду з урахуванням технічних вимог щодо нього та сучасного стану відповідної техніки. У цьому розділі дається лише коротка характеристика основних елементів. Як джерела випромінювання знаходять застосування газові, твердотільні, напівпровідникові лазери і лазери на барвниках, так що забезпечується генерація монохроматичного випромінювання майже по всьому оптичному спектру. Колімація пучка зазвичай здійснюється за допомогою телескопічних розширювачів, побудованих за схемою Галілея. У рідкісних випадках як коліматор використовується прийомний телескоп великого діаметра. І тут пред'являються підвищені вимоги до якості приймального телескопа. Приймальні телескопи найчастіше будуються за класичними схемами Ньютона (поодиноке дзеркало – параболоїд), Грегорі (увігнутий параболоїд та увігнутий еліпсоїд) та Кассегрена (увігнутий параболоїд та опуклий гіперболоїд). Найкоротша – схема Кассегрена. Випромінювач і приймальний блок можуть бути далеко рознесені один від одного або виконані в єдиному блоці, що останні роки є звичайним. Осі випромінювача та приймача можуть бути поєднані (коаксіальна схема) або рознесені (біаксіальна схема). У другому випадку виключається перенасичення приймача, але рівень зворотного сигналу дещо нижчий. У біаксіальних схемах осі можуть бути паралельні і нахилені один до одного (для забезпечення збігу центрів полів зору). Спектральний поділ здійснюється за допомогою поглинаючих фільтрів, світлодільників з дихроїчними покриттями (відображення – в одній області спектру, пропускання – в іншій), призм, дифракційних решіток. Роль спектральних вузькосмугових фільтрів грають інтерференційні фільтри та зразки Фабрі-Перо. У лідарах використовуються високочутливі фотоприймачі, оскільки зазвичай рівень зворотного сигналу дуже низький (на 7 ... 10 порядків нижче рівня потужності зонduючого лазерного імпульсу). Це насамперед фотоелектронні помножувачі (ФЕП), у тому числі в режимі рахунку окремих фотонів, лавинні фотодіоди та звичайні фотодіоди.

## 2.5 Схеми лазерного зондування атмосфери [22]

Існують дві основні схеми дистанційного зондування – бістатична і моностатична. Найбільшого поширення набула схема моностатичного зондування з суміщеними джерелом і приймачем випромінювання. У цій схемі передавач і приймач встановлюють в одному місці, наприклад на єдиному поворотному пристрої, яке дозволяє змінювати зелений кут і азимут зондування. Моностатичний лідар може мати як коаксіальне, так і біоксіальне розташування оптичних осей передавача та приймача.

У коаксіальній системі оптична вісь лазерного пучка збігається з оптичною віссю приймача. Можливі типи оптичної схеми лідара при коаксіальній конфігурації осей показано на рис. 2.6. В оптичній схемі, показаній на рис. 2.6,а відбувається роздільне поширення променя лазерного передавача і випромінювання, що приймається, а у випадках, показаних на рис. 2.6,б, в промінь лазерного передавача відбивається від дзеркала приймальної оптичної системи (тобто зондувальне випромінювання формується головним дзеркалом приймальної оптичної системи).

У біаксіальній системі лазерний пучок джерела випромінювання входить у поле зору приймача тільки на деякій, наперед визначеній відстані (рис. 2.7,а). Така схема є різновидом схеми зондування з суміщеним джерелом і приймачем, в якій передавальна і приймальна системи розміщені на невеликій відстані один від одного (кажуть, що лідар має «малу базу» - зазвичай близько метра). Перевагою такої схеми є можливість автоматичного відсікання інтенсивного променя від щільних шарів атмосфери в ближній зоні локатора, що викликає насичення фотодетектора приймача. Недолік цієї схеми зондування пов'язаний з необхідністю високоточного налаштування перетину оптичних осей джерела та приймача.

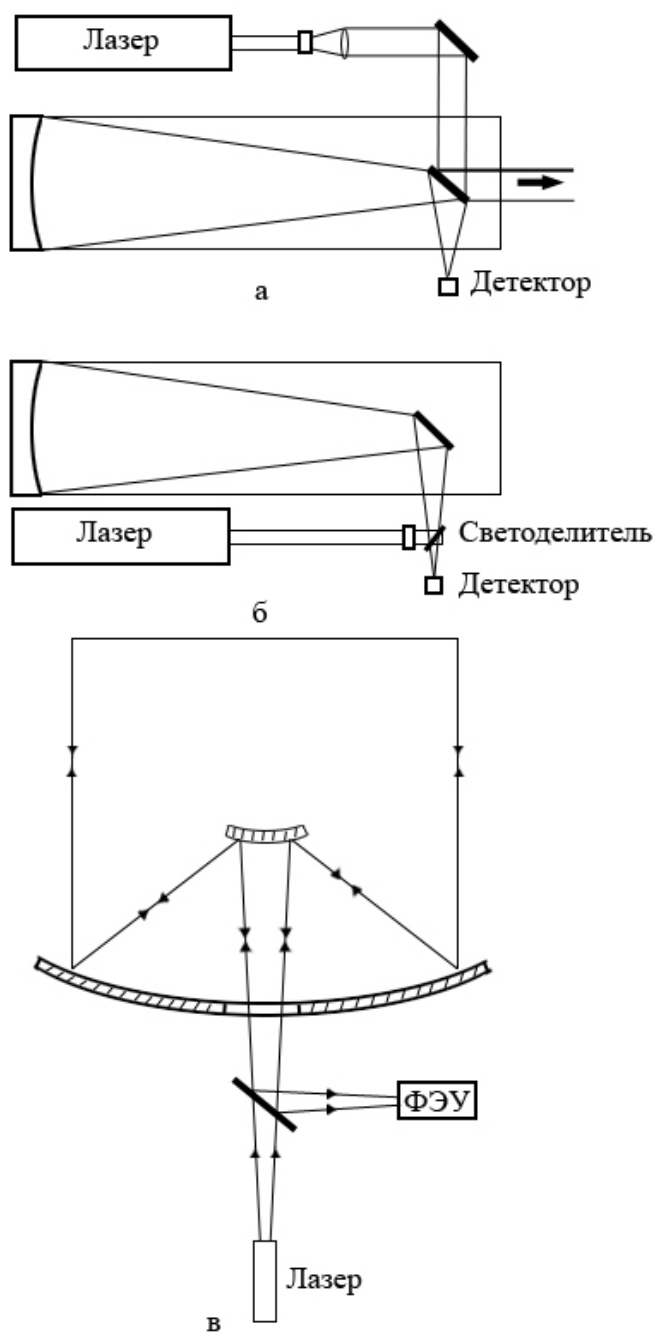


Рис. 2.6 – Оптичні схеми моностатичного лідара з коаксіальною конфігурацією оптичних осей: а — роздільне поширення променя лазерного передавача і випромінювання, що приймається; б і в - два варіанти відбиття променя лазерного передавача від дзеркала приймальної оптичної системи.

Схеми зондування, зображені на рис. 2.6 і 2.7,а, вимагають використання імпульсного лазерного випромінювання. Якщо в цих схемах застосувати безпе-

первне немодульоване лазерне випромінювання, то, наприклад при зондуванні атмосфери, приймальна система реєструватиме ехо-сигнали, що одночасно надходять з різних атмосферних шарів. Розшифрування такої суміші ехо-сигналів практично неможливе.

На рис. 2.7,б зображена бістатична схема лазерного зондування. Характерною особливістю цієї схеми є велика база між джерелом і приймачем. Оптичні осі джерела і приймача в такій схемі зондування можуть перетинатися (наприклад, при зондуванні атмосфери із земної поверхні) на різних висотах і під різними кутами.

Якщо зафіксувати висоту перетину, то приймач отримуватиме інформацію у вигляді розсіяного випромінювання від одного і того ж локалізованого обсягу атмосфери. Це дозволяє безперервно стежити за динамікою процесів у вибраному обсязі. При безперервній зміні нахилу оптичної осі джерела (приймача) можна змінювати висоту зондування і проводити дослідження вертикального профілю того чи іншого параметра атмосфери (для відносно повільної зміни параметрів за часом). При зондуванні за бістатичною схемою переважно використовувати лазери з безперервним випромінюванням.

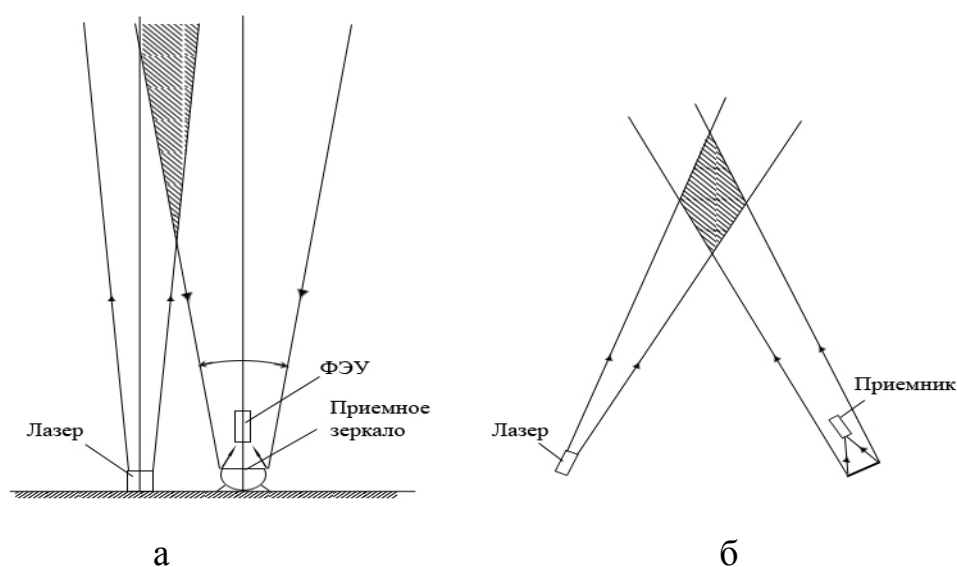


Рисунок 2.7 – Схеми зондування: біаксіальна (а) і бістатична (б)



В останні десятиліття створені різні лазерні системи дистанційного зондування для вимірювання характеристик атмосфери і гідросфери, включаючи як великогабаритні стаціонарні лідари, для дослідження тропосфери і стратосфери, так і невеликі мобільні прилади, які встановлюють на автомобілях, кораблях та літаках. Найближчим часом слід очікувати появи лазерних систем зондування космічного базування щодо постійного моніторингу природного середовища.

## 2.6 Аналіз можливостей лідарних методів дослідження атмосфери

Теоретичні та експериментальні дослідження в галузі метеорологічної лазерної локації відкривають нові можливості у вивченні параметрів атмосфери, прогнозування погоди, організації контролю впливів на навколишнє середовище та ін.

Лазерно-локаційні вимірювання параметрів атмосфери є дистанційними і не потребують метеорологічних підйомних засобів, таких як стратостати, балони та метеорологічні ракети. Тому при такому способі вимірювань немає приладу, що обурюючої дії на повітряне середовище і, отже, немає необхідності розглядати газодинамічні ефекти взаємодії вимірювального датчика з атмосферою, облік яких часом буває не тільки дуже складний, але і неможливий. Лідари можна використовувати в будь-якій точці Землі та отримувати при зондуванні розрізи атмосфери за невеликі проміжки часу, коли стан основних атмосферних параметрів не встигає змінитись. Використання хвиль оптичного діапазону дозволяє створити малогабаритну приймально-передавальну апаратуру лазерного локатора в порівнянні з аналогічною радіотехнічною апаратурою, що важливо при створенні бортових лідарних систем.

При поширенні лазерного випромінювання в атмосфері використовуються ефекти взаємодії електромагнітної хвилі з атмосферою, які дозволяють зробити висновок про її властивості. До цих ефектів відносяться: розсіювання на атмосферних аерозолях, молекулярне розсіювання, спонтанне комбінаційне розсіювання, резонансне розсіювання та поглинання, деполяризація, доплерівське

теплове розширення та зсув частоти випромінювання, флуктуації амплітуди та фази світлової хвилі. Більшість перелічених явищ спостерігається одночасно, і практична сторона справи полягає у створенні способів виділення із загальної інформації тієї частини, яка містить цікаву характеристику атмосфери.

Принципово, використовуючи лазерні методи досліджень, можна отримати дані про всі найважливіші параметри атмосфери .

До стандартних метеорологічних параметрів відносяться: температура, тиск, швидкість та напрям вітру, вологість атмосфери, щільність та концентрація домішок. Для складання довгострокових прогнозів погоди та вирішення проблем контролю повітряного басейну необхідно вимірювати зазначені параметри з високою просторовою та тимчасовою роздільною здатністю. Застосовувані в цих цілях контактні датчики, встановлювані на радіозондах і метеорологічних ракетах, характеризуються значною дискретністю у часі та просторі.

Лазерні методи, що використовуються для дистанційного вимірювання стандартних параметрів атмосфери, забезпечують високу просторову роздільну здатність, швидкість та високу частоту вимірювань.

Нині найширше застосовуються лідарні системи виміру стандартних метеорологічних параметрів на висотах до 10 – 20 км [2-8]. Значна щільність атмосфери на цих висотах створює потужний сигнал зворотного розсіювання, що дозволяє застосовувати стандартні промислові лазери і невеликі за габаритами прийомні оптичні системи. Можливість вимірювання на цих висотах метеорологічних параметрів за допомогою підйомних куль-радіозондів дозволяє проводити калібрування апаратних засобів лідарних систем та оцінити помилки вимірювання метеорологічних параметрів.

Велику увагу в даний час приділяється вивченню озонового шару стратосфери на висотах 20-30 км, який захищає приземне середовище від жорсткого ультрафіолетового випромінювання Сонця. Проведення ядерних випробувань, запуски космічних ракет, польоти висотних надзвукових літаків, промислові викиди в атмосферу руйнують озоновий шар, що може спричинити несприятливий вплив на екологічну рівновагу біосфери Землі.

В даний час контроль концентрації озону здійснюється наземними фотометричними станціями, що вимірюють рівень ультрафіолетового випромінювання Сонця через атмосферу. Відсутність відомостей про вертикальну та просторову стратифікацію не дозволяє вивчати динаміку шару. Балонний метод вивчення стратосферного озону, що застосовується в даний час, економічно не вигідний.

Вимірювання висотного профілю концентрації озону лідарними системами за методом диференціального поглинання дозволяє створювати мережу озонOMETричних станцій, що отримують тривалі ряди спостережень з високим просторовим дозволом. Обговорюється можливість встановлення лідарного озонOMETра на борту космічного апарату для дослідження озонового шару на більшій частині Земної кулі.

Значний інтерес до складання довгострокових прогнозів погоди, вивчення динамічного стану атмосфери, оцінки ролі Сонячно-Земних зв'язків представляють лідерські дистанційні методи вивчення параметрів страто-мезосфери та нижньої термосфери.

Для вивчення верхньої атмосфери найбільше широко використовують висотні метеорологічні ракети, застосування яких пов'язане з великими матеріальними витратами. Ракетний метод накладає жорсткі обмеження на вибір місця розташування стартових майданчиків і тому не може забезпечити безперервних тривалих часових та просторових рядів спостережень на користь моніторингу.

При проектуванні лідара необхідно враховувати, що зі зростанням висоти зменшується щільність атмосфери і, як наслідок, зменшується сигнал зворотного розсіювання, що вимагає застосування потужних унікальних лазерів і великих за габаритами оптичних прийомних систем.

Основним ефектом взаємодії електромагнітної хвилі з повітряним середовищем на великих висотах, які мають практичне застосування в метеорологічних лідарах, є резонансне розсіювання. На висотах 80-100 км постійно знаходиться атомарний натрій з концентрацією  $10^3$ - $10^4$  см<sup>-3</sup> та інші домішки. Зазначені висоти є достатньо інформаційними з точки зору багатьох геофізичних проблем: сріблясті хмари, мезопауза, абляція метеорної речовини та ін. На довжинах хвиль,

що відповідають збудженню натрію з основного рівня - 589 нм, можна використувати випромінювання потужних імпульсних лазерів, що перебудовуються на органічних барвниках (наприклад - родамін 6G) [5]. При зазначеній концентрації натрію коефіцієнт зворотного резонансного розсіювання становить  $10^{-10}$  -  $10^{-9}$   $\text{см}^2 \cdot \text{ср}^{-1}$ . Ця величина значно більша за коефіцієнти зворотного молекулярного розсіювання на висотах 80 – 100 км ( $2 \cdot 10^{-13}$  -  $3 \cdot 10^{-15}$   $\text{см}^2 \cdot \text{ср}^{-1}$ ) та зворотного аерозольного розсіювання ( $10^{-12}$   $\text{см}^2 \cdot \text{ср}^{-1}$ ), отриманого при лазерному зондуванні атмосфери до висот 120 км, де спостерігається абляція та гальмування космічної речовини метеорної матерії.

Проведені лідарні вимірювання густини натрію на висотах 80 – 100 км свідчать про нерегулярну структуру шару [4]. [26]. Сезонні варіації шару натрію узгоджуються з даними сутінкових спостережень. Зростання концентрації натрієвого шару у періоди метеорних потоків вказують на можливе метеорне джерело формування натрієвого шару. Вивчення динаміки нижньої межі шару дозволяє будувати висновки про фотохімічні процеси, які протікають у зазначених висотах .

У процесі лідарного зондування натрієвого шару були виміряні температурні режими атмосфери з використанням натрієвої поглинаючої камери. З використанням лазерної доплерівської апаратури метод може бути застосований для визначення швидкості та напрямку вітру у верхній атмосфері .

Проводячи зондування у трьох рознесених точках простору, шляхом кореляційного аналізу висотних профілів шару натрію оцінені горизонтальні швидкості вітру на висотах 80 – 100 км . Отримане значення горизонтальної швидкості становить 50 м/с, що відповідає значенням, отриманим за допомогою метеорних та ракетних спостережень [26].

На сьогодні за методом резонансного розсіювання проведено зондування атмосферного калію, літію та інших малих домішок у верхній атмосфері (наприклад: Ca, Ca<sup>+</sup>, Fe та ін.).

### 2.6.1 Аналіз хвильових процесів в атмосфері

Одним із найбільш широко обговорюваних в даний час явищ у верхній атмосфері Землі слід назвати постійно існуючі хвилеподібні неоднорідності щільності та складу нейтральних та іонізованих атмосферних компонентів. Загальновизнане трактування фізичної природи цих неоднорідностей засноване на уявленнях про акустико-гравітаційні хвилі, що змінюють локальні щільні характеристики атмосфери майже у всій її товщі – від земної поверхні до висот кілька сотень кілометрів [1], [26].

Лідарні вимірювання атмосферного натрію на висотах 80 - 100 км за методом резонансного розсіювання, проведені у нас в країні [25] та за кордоном [26], виявили значну стратифікацію щільності натрієвого шару та вертикальне переміщення екстремумів концентрації. Виміряна модуляція щільності натрієвого шару, і навіть динамічні процеси, що з ними, дозволяють віднести ці явища до прояву внутрішніх гравітаційних хвиль (ВГВ). У деяких джерелах прийнято термін - хвилі плавучості .

Атмосферні гравітаційні хвилі є коливаннями атмосфери, природа яких значною мірою визначається дією сили тяжіння. Їхні періоди лежать у межах 10 хвилин – 24 години, а довжини хвиль 100 м – 1000 км. У цьому сенсі вони включають деякі моди приливних коливань .

На низьких частотах основний внесок роблять зміни погоди синоптичного масштабу, припливи, добове сонячне нагрівання та періодичні зміни напряму бризової циркуляції. На більш високих частотах головний внесок належить хвилям плавучості (ВГВ), конвекції та турбулентності, що переноситься вітром. Добові та піддобові коливання щільності виявляються як результат приливів та інших добових впливів .

Стратифікація щільності атмосфери під впливом гравітаційного поля здебільшого статистично стійка, і саме ця стійкість дозволяє виділити хвилі плавучості (ВГВ) як зручний і важливий предмет геофізичних досліджень .

Через зменшення щільності атмосфери зі збільшенням висоти амплітуда хвиль зростає, що є наслідком закону збереження енергії . Багато хвиль, що спо-

стерігаються у верхніх шарах атмосфери, утворюються нижче тієї висоти, на якій можна їх спостерігати. У процесі їх утворення вони відбирають енергію і кількість руху за величиною менші в порівнянні з кінетичною енергією і кількістю руху генеруючої хвилі середовища, але вже достатні, щоб надати вирішальний вплив на розріджені шари, розташовані вище .

Якщо спостерігати поширення вертикальної фази ВГВ, воно майже незмінно спрямоване вниз [4]. Внаслідок анізотропії, що вноситься силою тяжкості, енергія хвилі в загальному випадку передається не в тому напрямку, куди поширюється фаза. У хвилі, енергія якої спрямована похило нагору, фаза поширюється похило вниз. Більшість джерел, що породжують гравітаційні хвилі у верхній атмосфері, розташовані на нижніх рівнях, що забезпечують їх енергією .

Значні швидкості вітру при поширенні хвилі в атмосфері з великим вертикальним зсувом призводять до виникнення нестійкості та руйнування хвиль. У згасанні хвиль основну роль грають чотири фізичні процеси: турбулентна дифузія, в'язка дисипація, захоплення хвиль критичними шарами атмосфери, нелінійні ефекти .

Спектр хвиль, що спостерігаються в будь-якому заданому місці в будь-який заданий момент, повинен складатися як компонент довжин хвиль, порівняно вільних від ефектів згасання, так і з компонентів, схильних до сильного згасання.

Джерела ВГВ можна умовно поділити на 4 групи [25]:

- джерела, пов'язані з процесами в атмосфері - грозові фронти, струменеві течії, полярні саява та ін;
- джерела, пов'язані із взаємодією з космічними тілами – приливні коливання, висипання енергетичних частинок у верхній атмосфері та ін;
- джерела, пов'язані з процесами, що протікають на поверхні Землі – виверження вулканів, землетруси, коливання поверхні океану та інші;
- антропогенні джерела, пов'язані з діяльністю людини – ядерні та будівельні вибухи, запуски ракет, польоти надзвукових літаків та ін.

Вивчення хвильових процесів в атмосфері дозволяє визначити параметри цих процесів (фазу, амплітуду, частоту, параметр загасання), визначити напрямок

поширення хвильових рухів і, вирішуючи екстраполяційне завдання, визначити координати джерел ВГВ. Це відкриває нові можливості у вирішенні таких важливих завдань як прогнозування погоди, контроль повітряного середовища, визначення ступеня впливу людської діяльності на атмосферу, а також дозволяє дистанційно визначати координати запуску ракет, ядерних вибухів та інших енергетичних впливів на атмосферу.

## 2.7 Лідарне рівняння [1]

Характеристики будь-якої лідарної системи визначаються лідарним рівнянням (рівнянням лазерної локації), яке записується у вигляді

$$E(H) = (\eta \cdot T_A^2) \cdot E_0 \cdot \sigma \cdot n_s(H) \cdot \Delta H \cdot \left( \frac{S}{4\pi H^2} \right), \quad (2.1)$$

де  $E(H)$  - очікувана енергія фотонів, що прийшли з інтервалу дальності від  $H - \Delta H/2$  до  $H + \Delta H/2$ ;  $n_s(H)$  - абсолютна концентрація атомів або молекул, які розсіюють випромінювання на дальності  $H$ ;  $\sigma$  - ефективний перетин розсіювання;  $\Delta H$  - довжина розрешувального інтервалу по дальності;  $S_{\text{пр}}$  - площа апертури приймального телескопа;  $E_0$  - енергія випромінювання передавача;  $T_A$  - коефіцієнт пропусчення атмосфери за один прохід;  $\eta$  - оптичний ККД лідара, що дорівнює добутку коефіцієнтів пропусчення приймальної та передавальної оптичних систем.

Коефіцієнт пропусчення атмосфери  $T_A$  визначається співвідношенням

$$T_A(H) = \exp[-\tau(H)] = \exp\left\{-\int_0^H [\beta(H) + \alpha(H)] dh\right\}, \quad (2.2)$$

де  $\tau(H) = \exp\left\{-\int_0^H [\beta(H) + \alpha(H)] dh\right\}$  - оптична товщина атмосферного тракту.

до висоти  $H$ .

Оскільки електромагнітне випромінювання поглинається та розсіюється в

основному у нижній атмосфері, то починаючи з висот приблизно 10 км пропущення атмосфери майже не змінюється, тому в рівнянні локації для верхньої атмосфери (вище за 30 км) можна записувати  $T_A$  без індексу  $H$ .

Коефіцієнт  $\eta$  містить у собі оптичні ефективності світлоподілювачів, лінз, дзеркал і оптичних фільтрів у передавачі й приймальному телескопі, а також квантовий вихід ФЕП.

Рівняння (2.1) отримано за припущення, що ослаблення лазерного випромінювання при поширенні через атмосферний прошарок, що дорівнює висотному інтервалу зондування, є незначним (оптично тонкий шар).



## 3 ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ РЕЗОНАНСНИХ ЛІДАРІВ

### 3.1 Типова структурна схема резонансного лідару

Під резонансним розсіюванням, зазвичай, розуміється розсіювання електромагнітних хвиль, при якому частота випромінювання, що падає на атомну або молекулярну систему, дорівнює або близька до однієї із частот їх власних електронних переходів (рис. 2.4). Вивчаючи ефекти, викликані резонансним розсіюванням, виявляється можливим визначати концентрацію компонентів і температуру шарів атмосфери.

На рис.3.1 [25] представлена узагальнена схема резонансного лідара, побудованого за біаксіальною схемою (рис. 2.7,а). Під час зондування атмосфери передавач настроюється на резонансну лінію поглинання атома. У більшості випадків використовуються лазери на барвниках, що накачуються світловим випромінюванням ламп. Деяка невелика частина випромінювання лазера направляється на датчики контролю довжини хвилі й енергії, а також на імпульсний фотодетектор, що синхронізує роботу прийомного пристрою. Імпульс лазерного випромінювання досягає шару атмосферної домішки й переводить атоми в збуджений стан. Якщо час життя атома в збудженому стані ( $\tau$ ) значно менше середньостатистичного інтервалу між зіткненнями, то гасінням флуоресценції можна зневажити й думати, що при переході в основний стан практично всі збуджені атоми ізотропно перевипромінюють. Розсіяне випромінювання збирається телескопом і фокусується на фотоелектронному помножувачі (ФЕП). Внаслідок дуже низького рівня зворотно-розсіяного сигналу ФЕП працює в режимі рахування окремих фотонів.

Для пригнічування фонові засвітленості фотоприймача випромінюванням, що розсіяне з низьких висот, використовується механічний затвор-обтюратор, що синхронізує включення лазера в момент перекриття ФЕП за допомогою оптопари світлодіод-фотодіод.

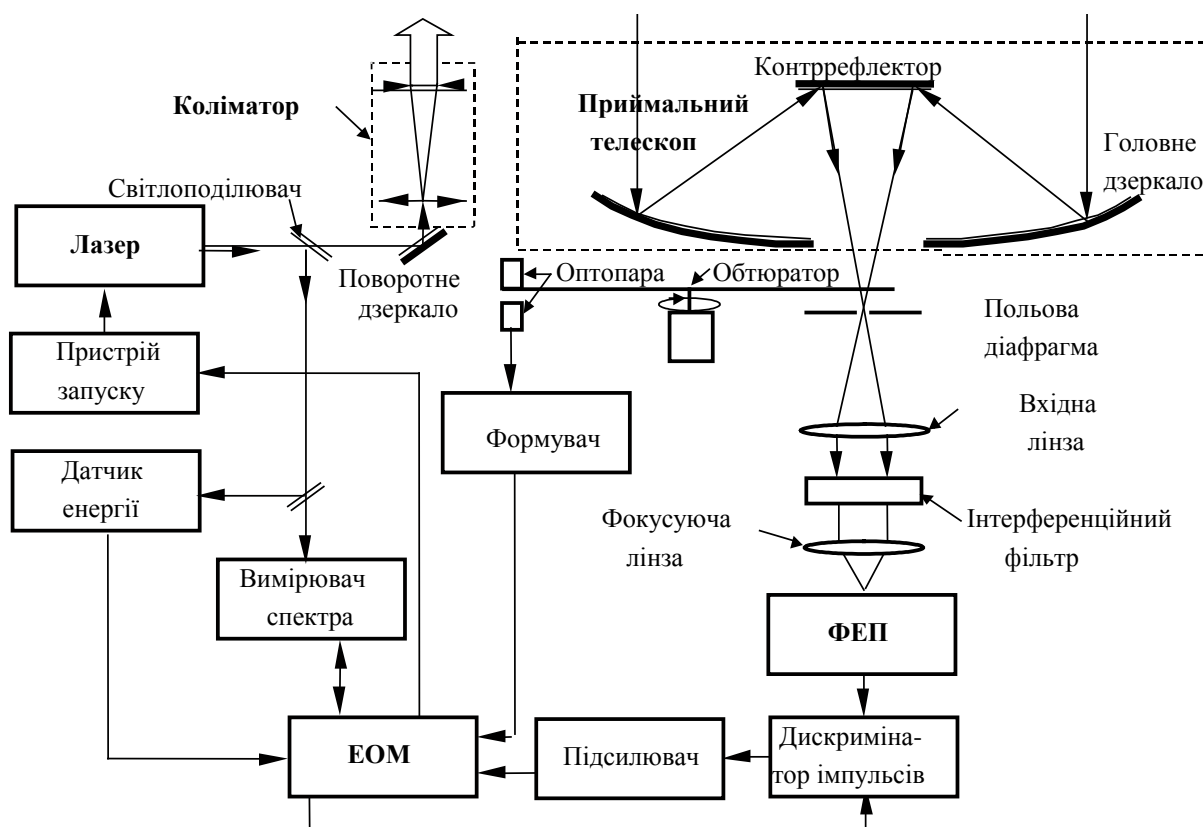


Рисунок 3.1 – Структурна схема резонансного лідара

Польова діафрагма обмежує кут зору приймального телескопа, а інтерференційний фільтр пригнічує більшу частину фонового випромінювання від зірок, місяця й сонця за межами спектра випромінювання лазера.

Сигнал ФЕП обробляється імпульсним дискримінатором, а також лічильником, що синхронізується за дальністю. Імпульсний дискримінатор перетворює слабкі імпульси ФЕП в логічні імпульси, які потім можна рахувати за допомогою стандартних швидкодіючих цифрових схем. Лидарні дані є серією фотоелектронів, що відповідають послідовним інтервалам по дальності. Сигналу від одиночного лазерного імпульсу може бути недостатньо для відновлення профілю концентрації домішки, тому залежно від необхідної точності вимірів фотони накопичуються по декілька імпульсів протягом сеансу зондування.

### 3.2 Лідарне рівняння для методу резонансного зондування

Внаслідок дуже низького рівня зворотнорозсіяного сигналу ФЕП частіше працює в режимі рахування окремих фотонів. Для приймального режиму лічення фотоелектронів лідарне рівняння (2.1) можна записати у вигляді [25]:

$$N(H) = \left( \eta \cdot T_A^2 \right) \cdot \left( \frac{E_0}{h\nu} \right) \cdot \sigma_{\text{еф}} \cdot n_s(H) \cdot \Delta H \cdot \left( \frac{S}{4\pi H^2} \right), \quad (3.1)$$

де  $N(H)$  – очікуване число фотонів, що прийшли з інтервалу дальності від  $H - \Delta H/2$  до  $H + \Delta H/2$ ;  $\nu$  – частота випромінювання;  $h$  – постійна Планка;  $\sigma_{\text{еф}}$  – ефективний перетин розсіювання випромінювання атмосферою домішкою.

Ефективний перетин розсіювання залежить від ширини спектра випромінювання лазера, а також від форми й ширини спектральної лінії поглинання атома домішки, що досліджується. У загальному вигляді ефективне значення перетину розсіювання визначається співвідношенням [25]:

$$\sigma_{\text{еф}} = \frac{\int \sigma(\lambda) \cdot E(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda} E(\lambda) d\lambda}, \quad (3.2)$$

де  $\sigma(\lambda)$  – спектральний профіль перетину резонансного розсіювання;  $E(\lambda)$  – контур спектра випромінювання лазера.

Таким чином, для однозначного визначення  $\sigma_{\text{еф}}$ , що входить у рівняння локації (3.1), необхідно мати аналітичні вираження для форми спектра випромінювання й спектральної залежності перетину поглинання переходу. Як правило, нормований спектр випромінювання лазера близький до гауссової кривої і може бути записаний рівнянням

$$E^0(\lambda) = \exp \left[ -4 \ln(2) \cdot \left( \frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta \lambda_{\gamma}} \right)^2 \right], \quad (3.3)$$

де  $\lambda_0$  – довжина хвилі максимуму спектра випромінювання;

$\Delta\lambda_l$  – ширина спектральної лінії лазерного випромінювання.

Залежність перетину поглинання від довжини хвилі, як правило, більш складна. Зокрема, для атомів лужних металів залежність перетину поглинання має вигляд

$$\sigma(\lambda) = \sigma_{max} \cdot \exp\left\{-\left[2\sqrt{\ln 2}(\lambda - \lambda_0)/\Delta\lambda_D\right]^2\right\} \quad (3.4)$$

де  $\sigma_{max}$  – перетин поглинання в максимумі;

$\lambda_0$  – частота центру спектру поглинання;

$\Delta\lambda_D$  – ширина спектру лінії поглинання.

Для гаусівської спектральної лінії ефективне значення перетину обчислюється за спрощеною формулою

$$\sigma_{ef} = \sigma_{max} \frac{\Delta\lambda_D}{\sqrt{(\Delta\lambda_D)^2 + (\Delta\lambda_l)^2}}, \quad (3.5)$$

Концентрація домішки, що досліджується, в принципі може бути отримана рішенням лідарного рівняння:

$$n_s = N(H) \cdot \left\{ \left( \eta \cdot T_A^2 \right) \cdot \left( \frac{E_0}{h\nu} \right) \cdot \sigma_{ef} \cdot \Delta H \cdot \left( \frac{S}{4\pi H^2} \right) \right\}^{-1}. \quad (3.6)$$

Однак аналіз отриманого співвідношення доводить, що для однозначного рішення необхідно знати коефіцієнт пропущення атмосфери  $T_A$ . Значення цього коефіцієнта пропущення можна отримати іншими методами, наприклад, по ослабленню випромінювання місяця або зірок, спектральна яскравість яких відома. Але при цьому метод резонансної локації перестає бути самодостатнім. Оскільки проникність атмосфери залежить від прозорості нижньої атмосфери (до 10 км) і виміряти її складно, абсолютне значення концентрації домішки звичайно розраховується шляхом нормування числа фотоелектронів, обумовлених атомами домішки, на число фотоелектронів, обумовлених релеевським розсіюванням на висотах, вільних від аерозолі (метод абсолютного калібрування сигналу). Для зменшення величини похибки вибирається висота в діапазоні  $H_m = 30 - 35$  км, де аерозолі

практично вже немає [22]. Щільність атмосфери береться зі стандартних моделей. Використовуючи значення сигналів, отриманих з обраних висот  $N_M$  і від домішки  $N_S$ , і виражених через параметри рівняння лазерної локації, одержимо спрощений вираз для визначення концентрації домішки в  $i$ -тому прошарку, на висоті  $H_S$ :

$$n_s = \frac{\sigma_M}{\sigma_{\text{еф}}} \cdot \frac{N_S}{N_M} \cdot \left( \frac{H_S}{H_M} \right)^2 \cdot n_M, \quad (3.6)$$

де індекси  $s$  і  $m$  відносяться відповідно до резонансного й молекулярного розсіювання;  $N_S$  і  $N_M$  – лідарні сигнали з висот  $H_S$  і  $H_M$ .

Згідно середньоширотної моделі стандартної атмосфери  $n_M = 3,69 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ ;  $\sigma_M = 5,2 \cdot 10^{-31} \text{ м}^2$  на висоті  $H_M = 30 \text{ км}$  [22].

Мінімальна концентрація домішок атмосфери, яка може бути виявлена в атмосфері за допомогою будь-якого лідарного методу, визначається [22]:

$$n_{s(\text{lim})} \geq \frac{10 \cdot \beta}{\sigma},$$

де  $\beta$  – коефіцієнт розсіювання всіх компонент атмосфери, крім резонансної;  $\sigma$  – перетин розсіювання домішки, що резонансно перевипромінює.

Перетин резонансного розсіювання електромагнітного випромінювання значно перевищує перетини для інших видів розсіювання, тому згідно з останнім рівнянням чутливість резонансних методів досліджень є максимальною.

### 3.3 Джерела помилок вимірювання енергії лідарного сигналу в режимі лічення фотонів

Відомі методики виміру параметрів атмосфери лідарними системами засновані на вимірі енергії розсіяного оптичного випромінювання. Тому точність вимірювання параметрів знаходиться у прямій залежності від точності вимірювання енергії відбитого сигналу.

Нині найбільш енергетично чутливим приймачем оптичного діапазону є фотоелектронний помножувач (ФЕП). Кількість квантів енергії, що падає на фотокатод ФЕП, визначає кількість струмових імпульсів на аноді ФЕП. Ця залежність має статистичний характер і, в загальному випадку, може бути виражена негативно-біномінальним законом розподілу [12].

Максимальна чутливість ФЕП реалізується у режимі лічення фотонів. При цьому струмові імпульси на аноді ФЕП можна поділити на три групи:

- поодинокі фотоелектрони формують на аноді ФЕП струмові імпульси, амплітуда яких визначається коефіцієнтом посилення всіх диодів;
- шумові імпульси, викликані процесами, що відбуваються в диодній системі, включаючи термо-, авто-і фотоемісію диодів, мають меншу амплітуду, оскільки при їх формуванні не повністю використовуються підсилювальні властивості диодної системи.
- найбільш потужні імпульси – «кляцання» – утворюються при ударі іонів по фотокатоду ФЕП та вибиванні кількох електронів, які після посилення диодами утворюють потужний струмовий імпульс.

Енергія розсіяного лазерного випромінювання збирається приймальним телескопом, у фокусі якого знаходиться ФЕП з вузькосмуговим інтерференційним оптичним фільтром. Фільтри, що застосовуються зі смугою 0,2 – 1 нм і високою контрастністю дозволяють знизити інтенсивність шумових імпульсів фонового засвічення в нічний час до рівня теплових шумів. Унікальні лабораторні зразки інтерференційних фільтрів пропускають електромагнітне випромінювання у смузі 0,02 – 0,03 нм, що дозволяє проводити лідарні виміри натрієвого шару у світлий час доби.

У блоці ФЕП фотоелектрони, що реєструються, селектуються по амплітуді і нормуються відповідно до параметрів застосовуваних мікросхем [25].

У приймально-реєструючій частині лідара потік імпульсів поділяється за часовими інтервалами. Мінімальна величина тимчасових (і відповідних їм висотних інтервалів) визначається тривалістю лазерного імпульсу та становить від одиниць до десятків мікросекунд.

Статистичний характер сигналу на виході фотоприймача, а також наявність шумової перешкоди, обумовленої тепловими шумами ФЕП та фоновим засвіченням, є основними джерелами випадкових помилок вимірювання енергії лазерного випромінювання.

Для досягнення необхідної точності вимірювання метеорологічних параметрів інформація, що надходить з виходу фотоелектронного перетворювача, обробляється в пристрої з урахуванням параметрів статистичного розподілу лідарного сигналу.

Основні джерела помилок вимірювання енергії лідарного сигналу в режимі лічення фотонів [22]:

- статистичний характер сигналу на виході фотоприймача визначає середньоквадратичну помилку, так званий, «статистичний шум»:

$$\delta N_c = \sqrt{N_c}, \quad (3.7)$$

де  $N_c$  – кількість зареєстрованих фотоімпульсів.

Звідки відносна похибка вимірювання

$$\frac{\delta}{N_c} = \frac{1}{\sqrt{N_c}}. \quad (3.8)$$

- наявність шумової перешкоди, обумовленої тепловими шумами ФЕП та фоновим засвіченням, збільшує середньоквадратичну помилку пропорційно множнику  $K$ :

$$K = \sqrt{1 + \frac{1}{g}}, \quad (3.9)$$

де  $g$  - відношення сигнал / шум.

Ці помилки є випадковими і не можуть бути зменшені апаратними засобами пристрою обробки лідарного сигналу.

Зменшити статистичну похибку можливо, якщо збільшити часовий інтервал накопичення імпульсів, що рівнозначно збільшенню розрішувально висотного інтервалу  $\Delta H$  (висотному інтервалу 1 км відповідає часовий інтервал 6,67 мкс).

Збільшення величини висотних інтервалів обмежено вертикальними розмірами неоднорідностей натрієвого шару, що спостерігаються, і зокрема, довжиною хвилі атмосферних хвильових процесів. Мінімальний розмір довжини хвилі ВГВ, який впевнено вимірюється лідарними системами на рівні натрієвого шару, становить 3 км.

Таким чином максимальна тривалість часового інтервалу накопичення імпульсів у одному каналі не може бути більшою ніж 20 мікросекунд, що відповідає висотному інтервалу 3 км.

Для підвищення точності вимірювань застосовують режим накопичення сигналу по багатьох зондувальних імпульсів. Однак це знижує можливості дослідження динаміки атмосфери.



## 4 МЕЖІ ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗОНАНСНОГО МЕТОДУ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА РОЗРАХУНКИ ГРАНИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

### 4.1 Характеристика та природа домішкових шарів у верхній атмосфері. Стан досліджень

Для дослідження фотохімічних та динамічних процесів, що відбуваються у верхній мезосфері - нижній термосфері (висота 70 – 120 км), вже понад 30 років застосовуються лазерні локаційні системи (лідари), що використовують ефект резонансної флуоресценції на атомах металів та їх іонах, у тому числі натрію, літію, калію, кальцію, заліза, іонів кальцію, магнію барію та ін [22]. Основним джерелом утворення металовмісних шарів у цій галузі атмосфери вважають абляцію метеорної речовини. Метеорні потоки, надходячи в атмосферу Землі, забезпечують значну кількість металевих трасерів, стеження за якими дозволяє не лише отримати відомості про склад метеорної матерії, а й дані про параметри верхньої атмосфери.

Порядок величин поперечних перерізів резонансного розсіювання наочно свідчить про потенційні можливості методу [26]. Використання резонансного розсіювання лазерного випромінювання на атомах і іонах металів є перспективним, передусім, при спостереженнях метеорної матерії, що надходить у атмосферу Землі. З результатів роботи випливає, що атоми та іони металів дають основні лінії, виявлені у спектрах світіння метеорів на висотах 80-130 км. При цьому спектри метеорних потоків, що мають велику геоцентричну швидкість, характеризуються сильними лініями іонів на відміну від потоків з малою геоцентричною швидкістю.

Найбільше робіт присвячено резонансній флуоресценції натрію, що пояснюється його високим вмістом в атмосфері, великою величиною перетину зворотного розсіювання та наявністю ефективних лазерних джерел випромінювання на довжині хвилі відповідної резонансної довжини хвилі атома [25]. Натрієвий

шар, як і інші металовмісні шари, розташований на висотах від 80 до 110 км з незначними варіаціями кордонів і був відкритий ще наприкінці 20-х років минулого століття, задовго до появи резонансних лідарів, і спостерігався по резонансному розсіюванню сонячної радіації. Це дозволяло визначати головним чином сезонні варіації загального вмісту атомів у шарі.

Межі натрієвого шару були вперше визначені за ракетними вимірами денного свічення натрію [1], [22]. Поява перестроюваних лазерів на барвниках [5] дозволило дистанційно досліджувати вертикальну структуру натрієвого шару лідаром, що використовує резонансну флуоресценцію натрію (РФН лідар). Перші виміри були проведені в Англії, пізніше - у Франції, Бразилії, Японії, США, СРСР та ін.

В галузі атмосферних досліджень лідарні вимірювання натрієвого шару роблять важливий внесок у розуміння хімічних та динамічних процесів у районі мезопаузи [26]. Останнім часом для пояснення загальних закономірностей сезонних, добових та географічних варіацій структури натрієвого шару висунуто численні хімічні та динамічні механізми. Загальний вміст натрію в середніх широтах варіюється від літнього мінімального значення до зимового максимального значення у грудні-січні. Як вважається нині, сезонні та географічні варіації вмісту атомів Na в атмосфері сусідніх та низьких широт пов'язані зі зміною температури мезопаузи, що впливає на швидкості основних хімічних реакцій за участю атомарного натрію. Однак нещодавно виявлене зниження вмісту атомів Na влітку над Арктикою свідчить про те, можливі й інші механізми руйнування шару, такі як поглинання атомів Na частинками полярних мезосферних хмар, поглинання пиловими і димовими частинками, а також фотоіонізація.

Профіль розподілу атомів Na особливо чутливий до гравітаційних хвиль і припливів. Внутрішні гравітаційні хвилі, або хвилі плавучості, обумовлені головним чином збуреннями, що поширюються з нижньої атмосфери. Вважається, що основними джерелами гравітаційних хвиль є тропосферна конвекція, урагани, вітрові зрушення, набігання вітру на гори і навіть великомасштабні хвилі в океані. Гравітаційні хвилі поширюються через стратосферу та мезосферу і дисипують

свою енергію поблизу мезопаузи, вносячи важливий внесок у баланс кількості руху та турбулентності у цій галузі атмосфери. Хоча амплітуди збурень вітру гравітаційними хвилями в нижній атмосфері зазвичай дуже малі, без дисипації вони ростуть з висотою експоненційно і на висотах мезопаузи можуть досягати значень до 50 м/сек. На цих висотах хвилі можуть змінити густину атмосфери на 10-20% за кілька годин. Коли амплітуди стають занадто великими, нестійкості призводять до руйнування хвиль та дисипації їхньої енергії, створюючи турбулентність. Зміни щільності, турбулентність, а також вітри, зумовлені гравітаційними хвилями, істотно впливають на динаміку верхньої атмосфери і можуть впливати на політ будь-яких ракет, висотних літаків або космічних апаратів, що проходять через цю область. Іоносфера перекривається з верхньою частиною мезосфери і хвилі можуть створювати тут іоносферні обурення, які впливають на високочастотний та супутниковий зв'язок.

Поглинання сонячної радіації озоном, молекулами вуглекислого газу та водяної пари викликає атмосферні припливи, які поширюються через натрієвий шар. У низьких і середніх широтах добові та напівдобові припливи мають найбільший вплив на цей шар. В даний час загально визнано, що гравітаційні хвилі та припливи можуть відігравати головну роль у визначенні великомасштабної циркуляції та структури середньої атмосфери. Оскільки гравітаційні хвилі і припливи істотно впливають на натрієвий шар, їх просторово- тимчасові показники можна досліджувати з допомогою РФН лідаров [26].

У дослідженнях динаміки мезосфери РФН лідари, мабуть, найкращим способом підходять для виміру вертикальної структури хвиль та припливів. Лідарні системи привабливі також тим, що вони мобільні та не вимагають великого допоміжного обладнання для роботи. В даний час проводяться вимірювання за допомогою літакового лідара та запропоновано низку космічних систем. Останні особливо привабливі тим, що забезпечують глобальні виміри динаміки гравітаційних хвиль та припливів і можуть використовуватись для дослідження горизонтальної структури цих важливих хвильових явищ. На сучасному етапі відчувається брак даних щодо кліматології та горизонтальних характеристик як гравітацій-

них хвиль, так і припливів. Крім того, дуже мало відомо про географічний розподіл та характеристики джерел гравітаційних хвиль. Наземні та бортові лідари на РФН здатні забезпечити таку інформацію.

Крім хвильових рухів, на основі лідарних вимірювань, форми спектральної лінії Na можна відновлювати профілем температури в районі мезопаузи [22]. РФН лідари можуть бути використані також для вимірювання температури вище приблизно 35 км і нижче натрієвого шару, оскільки в цьому діапазоні висот розсіювання є чисто молекулярним, а рівень сигналу пропорційний щільності атмосфери. Тому при зондуванні РФН лідаром натрієвого шару отриманий сигнал молекулярного розсіювання на висотах від 35 до 70 км може використовуватись для дослідження густини та температури. Для того, щоб визначити температуру, вимірюваний профіль щільності інтегрується із залученням формул гідростатики та стану ідеального газу, а також деякого припущення про значення температури на верхньому рівні. Початкова температура може бути взята з моделі атмосфери для відповідної географічної широти, оскільки після інтегрування рівняння вниз на глибину приблизно півтора значення висоти "однорідної атмосфери", розрахована температура виявляється відносно нечутливою до початкової оцінки температури. Висотний діапазон вимірювань температури (щільності) по молекулярному розсіюванню обмежений: знизу - аерозольним розсіюванням, що порушує пропорційність реєстрованого сигналу і щільності повітря, а зверху - точністю вимірювань самого сигналу, що зменшується з висотою пропорційно щільності атмосфери і квадрату дальності зондування.

Серед методів вимірювання параметрів ВГВ особливу увагу займає метод лідарного зондування атмосферного натрію на висотах 80 – 100 км [4]. На цих висотах є природний натрій з концентрацією, достатньої для впевненого вимірювання сучасними лідарними системами. Зростання амплітуди хвильових процесів в атмосфері зі збільшенням висоти та досягнення максимальних значень на висотах близько 100 км призводить до помітної модуляції густини натрію .

Технічні характеристики лідарних систем дозволяють вивчати вертикальні профілі натрієвого шару, модульованого хвильовими процесами, з високим про-

сторовим та часовим дозволом, а мобільність лідарних систем та автоматизація їх управління дозволяють створювати мережі наземних лідарних станцій для вивчення просторових структур ВГВ.

Збільшення інформативності лідарного методу вимірювання параметрів ВГВ досягається запровадженням кутового сканування променя лідарної системи. У цьому здійснюється сканування у трьох – чотирьох точках простору, рознесених на відстань, порівнянну з довжиною хвилі досліджуваних процесів, тобто. 20 - 70 км.

Проводячи спільну обробку результатів зондування за всіма точками сканування, можна обчислити істинний вектор поширення фази хвильового процесу, тобто визначити напрямок на джерело ВГВ.

Використання резонансних лідарів для створення штучних опорних джерел випромінювання дозволяє значно підвищити якість адаптивних оптичних систем.

#### 4.2 Гранично допустимі значення енергії випромінювання передавача

Відповідно до рівняння лазерної локації (3.1) збільшення інтенсивності сигналу зворотного розсіювання доцільно збільшувати енергію випромінювання передавального пристрою. Насправді цьому перешкоджають ряд чинників, обумовлених як специфікою роботи приймального пристрою так і рахунку фотонів і характером взаємодії електромагнітного випромінювання з речовиною. Остання обставина, що тісно пов'язана з характеристиками випромінювача лідара розглядається в даному підрозділі.

Відомо, що при взаємодії електромагнітного випромінювання з речовиною мають місце три процеси: поглинання, спонтанне випромінювання і вимушене випромінювання. При цьому для отримання інформації в лазерній локації використовується спонтанне перевипромінювання атомами поглиненої енергії, оскільки саме спонтанне випромінювання внаслідок ізотропного характеру розсіювання потрапляє до апертури приймального пристрою. За наявності достатньої інтенсивності падаючої хвилі вимушене випромінювання, що поширюється у напрямку

падаючого випромінювання, може відігравати помітну роль і вносити похибку у виміри.

Запишемо рівняння балансу населеностей у стаціонарному наближенні для двох рівнів атома [25]:

$$I \cdot \sigma \cdot n_0 - \frac{h\nu \cdot n_1}{\tau} - I \cdot \sigma \cdot n_1 = 0, \quad (4.1)$$

$$n_0 + n_1 = n, \quad (4.2)$$

де  $n$  - концентрація атомів;

$n_0, n_1$  - населеності відповідно основного й збудженого станів;

$I$  - інтенсивність падаючого випромінювання.

Останній член рівняння (4.1) характеризує потужність змушеного випромінювання з одиниці об'єму. Відзначимо також зменшення поглинання через зменшення населеності основного рівня.

Якщо інтенсивність випромінювання на висоті зондування мала, то змушене випромінювання можна не враховувати, тому з огляду на те, що  $n_0 \approx n$  можна записати

$$I \cdot \sigma \cdot n = \frac{h\nu \cdot n_1}{\tau}. \quad (4.3)$$

Відповідно до останнього співвідношення потужність флуоресценції дорівнює в цьому випадку потужності, що поглинена атомами домішки. Отже вимірявши енергію флуоресценції, що попадає на приймальний пристрій можна, використовуючи лідарне рівняння, однозначно визначити невідому концентрацію.

Проаналізуємо загальний випадок, коли змушене випромінювання необхідно враховувати. Для цього перше рівняння системи (4.1), використовуючи (4.2), перепишемо у вигляді

$$I \cdot \sigma \cdot (n - n_1) - \frac{h\nu \cdot n_1}{\tau} - I \cdot \sigma \cdot n_1 = 0.$$

Після нескладних спрощень одержимо

$$\frac{h\nu \cdot n_1}{\tau} = I \cdot \sigma \cdot n \cdot (1 - 2\dot{n}_1), \quad (4.4)$$

де  $\dot{n}_1 = n_1/n$  - відносна населеність збудженого стану.

Порівняння отриманого співвідношення з (4.3) показує, що відносна погрішність визначення концентрації в цьому випадку дорівнює

$$\delta = 2\dot{n}_1. \quad (4.5)$$

Задаючись припустимою величиною погрішності можна визначити граничне значення інтенсивності лазерного випромінювання на висоті зондування. Для цього вирішивши рівняння (4.4) відносно  $I$  одержимо

$$I = I_s \cdot \frac{0,5 \cdot \delta}{1 - \delta}, \quad (4.6)$$

де  $I_s = h\nu / (\sigma_{ef} \tau)$  - так звана інтенсивність насичення переходу, при якій потужність змушеного випромінювання рівняється потужності спонтанного розпаду.

На рисунку 4.1 представлено залежність допустимої інтенсивності пучка від заданої похибки вимірювання концентрації домішки, що побудована з використанням формули 4.6.

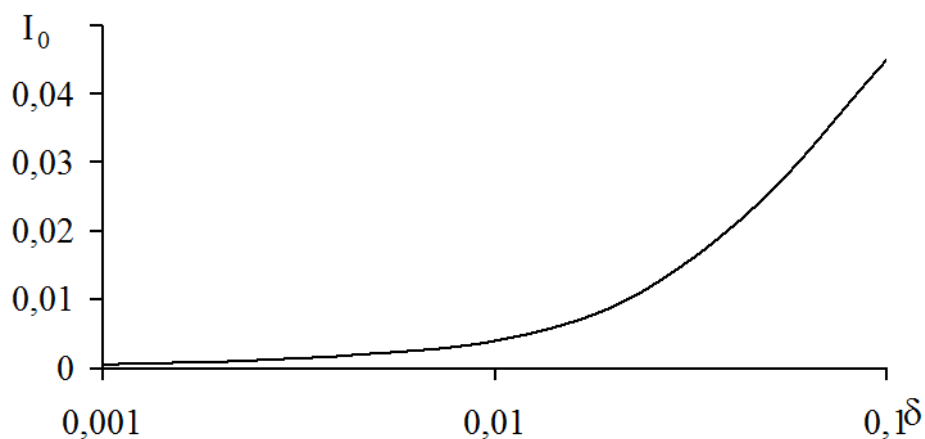


Рисунок 4.1 – Залежність припустимої відносної інтенсивності випромінювання від заданої похибки визначення концентрації атомів речовини

З рисунку 4.1 випливає, що для зменшення похибки визначення концентрації атомів атмосферних домішок необхідно зменшувати інтенсивність випромінювання.

Тут доречно зазначити таке. У виразі (4.1) для спрощення запису опущено індекси частоти для перетину та інтенсивності випромінювання. Тому в загальному випадку для отримання остаточної виразів необхідно здійснити інтегрування за спектром. Отже у вираженні для інтенсивності насичення слід вважати ефективне значення перетину розсіювання. Оскільки при зміні ширини спектра випромінювання перетин розсіювання також змінюється, гранично допустима інтенсивність випромінювання змінюватиметься відповідно.

Оцінімо допустиму величину енергії випромінювання передавача, що випромінює на довжині хвилі натрієвої лінії, якщо відносна похибка вимірювання концентрації не повинна перевищувати 5%, що цілком допустимо в більшості випадків. При цьому для простоти аналізу будемо припускати інтенсивність випромінювання лазера рівномірно розподіленої по перерізу пучка, а форму прямокутного імпульсу, тобто потужність постійної величини протягом тривалості імпульсу. Скористаємося типовими характеристиками випромінювача з ламповим накачуванням у складі лідара, призначеного для нічних спостережень [25]: тривалість імпульсу - 3,3 мксек (висотна роздільна здатність 0,5 км); розбіжність випромінювання –  $\alpha = 1$  мрад; ширина спектральної лінії –  $\Delta\lambda_n = 5$  пм. Для заданої спектральної смуги випромінювання, використовуючи вираз (3.5), знайдемо, що  $\sigma_{ef} = 3,3 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2$ . Звідси з огляду на час життя збудженого стану атома натрію  $\tau = 1,6 \cdot 10^{-8} \text{ с}$ , отримаємо інтенсивність насичення  $I_s = 6,3 \text{ Вт/см}^2$ , і, відповідно,  $I = 16,6 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/см}^2$ .

Шар натрію сконцентрований на висоті приблизно 100 км. Діаметр пучка випромінювання на цій висоті

$$D_H \approx \alpha \cdot H = 10^{-3} \cdot 10^5 = 100 \text{ м},$$

, а відповідна площа  $S \approx 8 \cdot 10^3 \text{ м}^2 = 8 \cdot 10^7 \text{ см}^2$ .



Отже, допустима потужність передавача без урахування послаблення при проходженні товщі атмосфери дорівнює:

$$P = I \cdot S = 16,6 \cdot 10^{-2} \cdot 8 \cdot 10^7 = 1,33 \cdot 10^7 \text{ Вт},$$

або переходячи при заданій тривалості імпульсу до енергії випромінювання, остаточно отримуємо

$$E = P \cdot \tau_u = 1,33 \cdot 10^7 \cdot 3,3 \cdot 10^{-6} = 44 \text{ Дж}.$$

Отримане значення значно перевищує енергетичні характеристики існуючих випромінювачів і є обмеженням. Ситуація змінюється у разі потреби зменшення діаграми спрямованості передавача з метою збільшення ставлення сигналу до фонові складові. Для роботи в денних умовах розбіжність випромінювання повинна бути зменшена приблизно на порядок [25], а гранична енергія випромінювання для цього випадку зменшиться відповідно майже на два порядки і складе 0,5 Дж. Аналіз характеристик існуючих на даний момент лідарних випромінювачів [5] показує, що енергія в імпульсі може помітно перевищувати отримане значення. У цьому випадку, очевидно, вибір енергії випромінювання передавача визначається компромісом між похибкою визначення концентрації, обумовленої вимушеним випромінюванням і статистичною похибкою, яка залежить від енергії випромінювання в імпульсі.

Проведені в роботі чисельні оцінки показують, що з забезпечення заданої точності визначення концентрації речовини необхідно кожному конкретному випадку визначати відповідне значення гранично допустимої потужності випромінювання передавача. У принципі при подальшому підвищенні енергії випромінювання понад допустиме похибка може бути усунена ускладненням процедури обробки шляхом введення в лідарне рівняння поправочних коефіцієнтів, що враховують зниження сигналу через зростаючу частку вимушеного випромінювання. Однак практичної реалізації цього способу перешкоджають цілий ряд факторів таких, як невизначеності коефіцієнта пропускання атмосферного тракту, розподілу інтенсивності перерізу пучка, яка може контролюватись на виході випромінювача, але абсолютно неоднозначна на висоті зондування через атмосферну турбу-

лентність, необхідність обліку форми імпульсу може змінюватись протягом сеансу зондування і т. ін.

### 4.3 Резонансні лідари в адаптивних оптичних системах

Адаптивна оптика - розділ оптики, що займається розробкою оптичних систем з динамічним управлінням формою хвильового фронту для компенсації випадкових збурень і підвищення межі дозволу спостережних приладів, ступеня концентрації випромінювання на приймачі або мішені і т. п [26]. Адаптивна оптика почала інтенсивно розвиватися в 1950-х роках, у зв'язку із завданням компенсації спотворень фронту, викликаних атмосферою турбулентністю і накладають основне обмеження на роздільну здатність наземних телескопів. Пізніше до цього додалися проблеми створення орбітальних телескопів і потужних лазерних випромінювачів, схильних до інших видів перешкод. Адаптивні оптичні системи класифікуються по порядку хвильових аберацій, які вони здатні компенсувати. Найпростіші системи - 1-го та 2-го порядків - змінюють загальний нахил хвильового фронту та його кривизну простим переміщенням окремих оптичних елементів фіксованої форми. Для систем вищого порядку як коригувальних елементів спочатку найчастіше використовувалися дзеркала, розбиті на відповідне число самостійно переміщуваних сегментів. Поступово вони витісняються гнучкими ("мембранними") дзеркалами, формою поверхні яких управляють або створенням згинальних моментів усередині дзеркала, або дією сил з боку несучої конструкції. Часто використовуються невеликі деформовані дзеркала з п'єзоелектричними приводами, що встановлюються на ділянках оптичної системи з помірними розмірами перерізу світлового пучка (неподалік фокальної площини об'єктива телескопа і т. п.).

Відомо, що атмосферна турбулентність погіршує якість зображень астрономічних та штучних космічних об'єктів, які отримують наземні телескопи [26]. Причина полягає в тому, що чим більші розміри головного дзеркала, тим більше вписується збурення хвильового фронту прийнятого випромінювання. Таким чи-

ном, збільшення розмірів телескопа з метою збільшення його кутового дозволу і межі виявлення втрачало сенс. Вихід із положення було знайдено за допомогою адаптивних оптичних систем з деформованими або сегментованими дзеркалами, керованими електроприводами.

Адаптивні оптичні системи мають можливість корекції спотворень, зумовлених атмосферною турбулентністю, за допомогою аналізу хвильового фронту випромінювання, прийнятого від досліджуваного об'єкта і близько до нього розташованого опорного точкового джерела. Випромінювання зворотного розсіювання від цього джерела проходить через турбулентну атмосферу, де піддається фазовим спотворенням. Хвильовий фронт реєструється датчиком хвильового фронту адаптивної оптичної системи і за результатами його аналізу проводиться корекція форми поверхні дзеркала. Однак кутова відстань між об'єктом і реперним джерелом, обумовлена умовою ізопланатизму, має бути не більше кількох секунд. Таким чином, оскільки далеко не завжди можливо виявити досить яскраву опорну зірку, розташовану всередині цього кута, поряд з розвитком адаптивних оптичних систем одночасно виникла проблема створення штучних опорних джерел з малими кутовими розмірами, які можуть бути поміщені на невеликій відстані від цілі. Крім того, використання в якості реперів природних зірок практично неприйнятне в режимі стеження за об'єктами, що рухаються.

Інформацію про необхідний вплив на хвильовий фронт отримують шляхом пробних збурень або безпосереднім виміром форми фронту. Обидва ці способи застосовуються під час створення, як приймальних, так і випромінюючих систем.

Нерідко до адаптивної оптики відносять також область лазерної техніки, пов'язану із застосуванням фазово-сполучених хвиль для автокомпенсації спотворень хвильового фронту в потужних лазерних підсилювачах. У деяких випадках вдається безпосереднє перетворення опорної хвилі в пов'язану з допомогою методів нелінійної оптики та голографії.

В області астрономії запропоновано використовувати лідарні системи на резонансній флюоресценції натрію (РФН) для створення штучних «коригувальних зірок» (guide stars), які можуть використовуватися наземними адаптивними теле-

скопами з метою компенсації спотворень зображення, зумовлених атмосферною турбулентністю [25], [26].

Концепцію штучних маяків було запропоновано кількома дослідниками незалежно один від одного на початку 1980-х рр [1]. На сьогодні існує два методи формування штучних зірок. Перший метод ґрунтується на використанні молекулярного релєївського розсіювання, другий – на резонансному розсіюванні лазерного випромінювання натрієвим шаром у мезосфері. Вибір натрію як об'єкт зондування обумовлений його порівняно високим вмістом у верхній атмосфері та великим перерізом розсіювання. Перші результати реалізації опорної зірки в натрієвому шарі були опубліковані в 1984 р

Найбільш широкого поширення набула моностатична конфігурація лідача (рис. 3.1), в якій лазерний пучок передається або вздовж оптичної осі приймального телескопа, або паралельно їй. Просторовий дозвіл досягається за рахунок використання імпульсного лазерного випромінювання та стробування детектора по дальності. Менш поширена бістатична (двопозиційна) конфігурація, в якій джерело і приймальний телескоп рознесені на відстань до 20 км. Просторовий дозвіл у цьому випадку забезпечується або сканування телескопом лазерного променя, або сканування лазером вздовж осі телескопа. Одні з перших лідарних вимірів провів на початку 1950-х років Ельтерман [1]. Для вимірювання профілів щільності та температури атмосфери на висоті від 10 до 60 км він використовував бістатичну систему, що складається з механічно модульованого прожектора і скануючого телескопа. За рахунок модуляції світла прожектора Ельтерману вдалося розділити сигнал розсіяного випромінювання і фоновий шум, обумовлений зірками і Місяцем. Зовсім недавно для вимірювань у верхній атмосфері запропонована схема бістатичного лідача з формуванням зображення, що не вимагає сканування лазером або телескопом.

Останнім часом дедалі більше зростає інтерес до адаптивних методів з урахуванням РФН-лідарів для астрономічних застосувань, включаючи адаптивні оптичні телескопи. Атмосферна турбулентність сильно обмежує кутову роздільну здатність наземних астрономічних телескопів. В умовах хорошої видимості в

кращих місцях, де розташовані обсерваторії, кутовий дозвіл зазвичай не перевищує 5 мкрад. За останні роки для компенсації турбулентності розроблені адаптивні оптичні системи з деформованими дзеркалами з електроприводами. На жаль, для цих систем потрібні яскраві опорні джерела безпосередньо поблизу об'єкта, що спостерігається, і тому вони можуть застосовуватися тільки для спостереження найбільш яскравих зірок. Фой і Лабейрі [1] першими запропонували використовувати лазери для створення штучних «коректуючих зірок», за допомогою яких можна було б керувати адаптивною системою з формуванням зображення. Томпсон і Гарднер [26] розвинули цю концепцію, визначивши ключові технічні параметри, які оптимізують роботу адаптивної системи, що відображає, з лазерним управлінням такого роду. Крім того, вони успішно провели в обсерваторії Мауна-Кеа на Гавайських островах перші експерименти з перевірки можливості застосування лазера для створення штучних коригувальних зірок в мезосферному натрієвому шарі. Хоча лазерні коригуючі зірки можуть створюватися у верхній атмосфері на основі релеевського розсіювання молекулами в стратосфері і резонансного розсіювання атомами лужних металів у мезосфері, Томпсон і Гарднер показали, що вимоги по потужності лазера є найменш жорсткими, коли коректування зірки створюються в натрієвому шарі. Згідно з їх розрахунками, лазер щодо помірної потужності 10-15 Вт з частотою повторення імпульсів 100 Гц здатний створити в натрієвому шарі коригуючу зірку досить яскраву, з тим, щоб забезпечити навіть більшому адаптивному телескопу діаметром 20-30 м вихід на дифракційну межу.

Резонансно-розсіяне натрієвим шаром лазерне випромінювання створює штучну «коригуючу зірку», яку можна використовувати для компенсації спотворень зображення, зумовлених атмосферною турбулентністю. Зображення контурів рівного числа фотовідрахунків було отримано за допомогою ПЗС-камери розміром 500X500, вміщеної у фокальній площині 2.2-го телескопа системи Кассегрена (Гавайський університет, обсерваторія Мауна-Кеа). Один елемент зображення (піксел) відповідає полю зору 3.4 мкрад. Горизонтальні смуги - це природні зірки, що переміщуються в поле зору за час 8-хвилин експозиції (рис. 4.2).

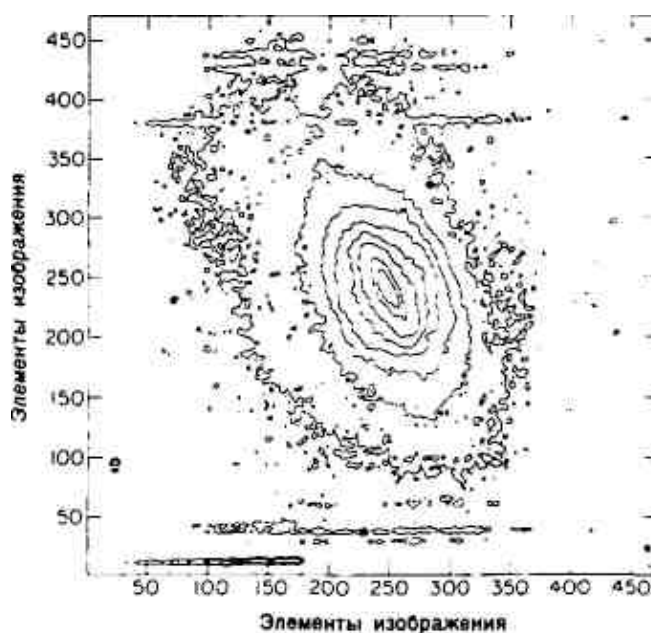


Рисунок 4.2 – Зображення штучної «коригуючої зірки» в фокальній площині адаптивного телескопу [26]

Пучок створювався лідарною системою UIUC, яка розташовувалася в іншій вежі обсерваторії на відстані 117 м на північний захід від телескопа, що формує зображення. Просторове рознесення лазера і телескопа, що формує зображення, було досить великим для запобігання накладення світла, що зазнав релєївське розсіювання на малих висотах, на лазерну пляму, що утворилася в натрієвому шарі на висоті близько 95 км. Асиметрія зображення лазерного пучка пов'язана з рознесенням лазера і телескопа, що формує зображення, а також з кінцевою товщиною натрієвого шару.

Основною проблемою при використанні штучних зірок є фокальний неізопланатизм, що виникає через те, що створюване реперне джерело випромінювання розташоване ближчій відстані до телескопа, ніж досліджуваний об'єкт. При роботі з натрієвим репером фокальний неізопланатизм виявляється набагато меншим, ніж при використанні з релєївським джерелом при однаковому розмірі дзеркала телескопа, оскільки натрієвий репер формується на висоті близько 90 км, на відміну від релєївського, висота якого обмежена 20 км. Коефіцієнт Штреля, який є мірою наближення оптичної системи до дифракційної межі при використанні натрієвої зірки, досягає значення 0,8.

Приймальний пристрій резонансного лідара зменшення статистичної помилки зазвичай працює у режимі накопичення фотонів за велику кількість лазерних імпульсів. У разі використання натрієвого шару для створення штучної зірки, проблема полягає в тому, щоб отримати достатній рівень сигналу від одного спалаху. Це з періодом “замороженої” турбулентності протягом якого параметри атмосфери залишаються незмінними і можлива корекція хвильового фронту. Час "замороженої" турбулентності може досягати декількох секунд, але нижня межа знаходиться на рівні 1 мсек. Отже, за цей час система повинна встигнути прийняти випромінювання від репера, провести обробку інформації та коригувати хвильовий фронт через електроприводи дзеркала. Для забезпечення цих умов лазер передавача повинен мати або частоту десятки кілогерц, що на два порядки вище межі на сьогоднішній день лазерів, придатних до даного використання або випромінювати в моноімпульсі енергію, достатню для нормального функціонування системи.

Для того, щоб вивести телескоп на межу дифракції кутовий розмір штучного джерела не повинен перевищувати області ізопланатизму. У видимій області кут ізопланатизму становить близько 10 мкрад. Отже розбіжність випромінювання передавального пристрою повинна бути близько  $10^{-5}$ , що рівнозначно діаметру пучка на висоті шару натрію близько метра. Досягнення таких просторових характеристик пучка можливе за умови роботи лазера поблизу дифракційної межі.

Таким чином, лазер придатний для роботи в лідарі, призначеному для створення штучної зірки, повинен володіти гранично малою розбіжністю випромінювання, вузькою шириною спектральної лінії та енергією випромінювання, достатньою для отримання інформації про властивості атмосфери від однієї реалізації. Необхідно враховувати ту обставину, що із зменшенням діаметра пучка висока інтенсивність випромінювання призводитиме до значного зростання частки вимушеного випромінювання. Дещо пом'якшує останнє той факт, що при створенні штучного репера взаємозв'язок між поглиненою та спонтанною енергією випромінювання не має значення, а важливо лише абсолютне значення спонтанно розсіяної енергії.

#### 4.4 Аналіз граничних енергетичних характеристик резонансного лідару для створення штучної «коригуючої зірки»

Розглянемо можливості резонансного методу створення реперного джерела. Відповідно до оцінок, наведених у роботі [26] для аналізу хвильового фронту необхідно мати рівень сигналу не менше кількох сотень фотоелектронів, тому стає очевидним перевага лазерів з ламповою накачкою при використанні їх у моностаціонарній конфігурації лідарної системи, в якій лазерний пучок передається або вздовж осі телескопа або паралельно їй. Лазери з ламповим накачуванням працюють у мікросекундному діапазоні тривалостей, що забезпечує їх перевагу в порівнянні з джерелами випромінювання з когерентним накачуванням, оскільки останні досягають тієї ж інтенсивності при значно менших значеннях енергії випромінювання та рівня енергії на вході приймальної системи, отриманого від одного спалаху, виявляється недостатньо для аналізу хвильового фронту.

Розглянемо яка частина поглиненої енергії спонтанно перевипромінюватиметься атомами. Для цього перетворюємо вираз (4.1) наступним чином:

$$\frac{h\nu \cdot n_1}{\tau} / I \cdot \sigma \cdot n = \frac{1}{1 + 2I_0}, \quad (4.1)$$

де  $I_0 = I/I_s$  - відносна інтенсивність випромінювання на висоті натрієвого шару.

Права частина рівняння (4.7) є поправкою в рівняння лазерної локації, що враховує зменшення сигналу, що приймається за рахунок вимушеного випромінювання. Коефіцієнт ослаблення монотонно убуває від одиничного значення при нулі при необмеженому зростанні інтенсивності випромінювання (рисунок 4.3).

Для визначення абсолютного значення потужності спонтанного випромінювання вкотре перетворимо отримане співвідношення як:

$$P_{cп} = \frac{h\nu \cdot n_1}{\tau} = n\sigma I_s \cdot \frac{I_0}{1 + 2I_0} = \frac{h\nu \cdot n}{\tau} \cdot \frac{I_0}{1 + 2I_0}, \quad (4.2)$$



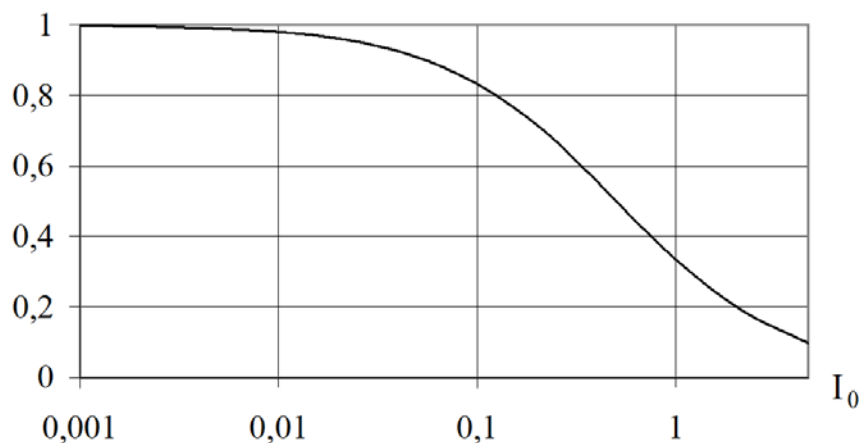


Рисунок 4.3 – Графік залежності коефіцієнта послаблення від відносної інтенсивності випромінювання

Для відносної потужності флуоресценції можна записати:

$$P_{\text{сп}}^0 = \frac{P_{\text{сп}}}{h\nu \cdot n/\tau} = \frac{I_0}{1 + 2I_0}. \quad (4.3)$$

Аналіз отриманих виразів показує, що зі зростанням інтенсивності випромінювання потужність флуоресценції монотонно прагне до межі, що визначається співвідношенням  $h\nu \cdot n/(2\tau)$ .

На рисунку 4.4 подано результати розрахунку з використанням виразу (4.9). З рисунку видно, що вже при  $I_0 = 1$  потужність спонтанного розпаду лише приблизно в півтора рази поступається своїй межі, що робить малопривабливим подальше збільшення інтенсивності лазерного випромінювання.

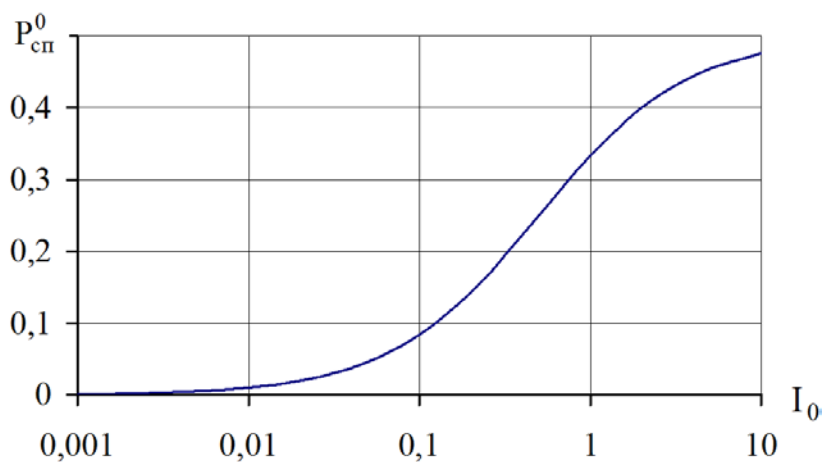


Рисунок 4.4 – Залежність потужності, що розсіюється атомами, від відносної інтенсивності випромінювання

Наведений в роботі аналіз показує, що за наявності досить інтенсивного вимушеного випромінювання процедура розрахунків величини сигналу, що приймається приймальним пристроєм, ускладнюється, оскільки в цьому випадку при заданні енергії випромінювання передавача необхідно враховувати відповідний коефіцієнт ослаблення за формулою (4.7). Ще складнішою виявляється зворотне завдання розрахунку необхідної енергії випромінювання при заданому рівні сигналу на приймальному пристрої.

З лідарного рівняння (3.1) випливає, що величина сигналу, що приймається, прямо пропорційна висотному інтервалу, відповідному часовому інтервалу протягом якого відбувається накопичення сигналу. З іншого боку, збільшення цього інтервалу може погіршити якість зображення за рахунок протяжності опорного джерела. Можна визначити з геометричних міркувань, що “розмиття” кутового розміру від нескінченно вузького циліндра, протяжністю визначається виразом [25]:

$$\delta\theta \approx \frac{\Delta z \cdot (s + 0,5d)}{z^2}, \quad (4.10)$$

де  $s$  - відстань між осями телескопа та випромінювання на рівні лідара;

$d$  – діаметр телескопа.

Вважаючи  $s \approx d$ , отримаємо:

$$\delta\theta \approx 1,5 \cdot \frac{\Delta z \cdot d}{z^2}. \quad (4.11)$$

Прирівнявши цей вираз до виразу для дифракційного кута, отримаємо умову:

$$\Delta z \leq \frac{1,6 \cdot \lambda \cdot z^2}{d^2} \quad (4.12)$$

Розрахунок з використанням наведеного співвідношення показує, що для метрового телескопа висотний інтервал, що дорівнює 6 км, призводить до розмиття зображення приблизно рівної дифракційної межі, що визначається діаметром дзеркала. Аналіз виразу також показує, що при збільшенні розмірів телескопа висотний інтервал, що відповідає дифракційній межі, повинен зменшуватися пропо-

рційно квадрату діаметра. Однак рівень сигналу залишиться незмінним, оскільки, з одного боку, зменшення часу накопичення призводить до зменшення сигналу, з іншого боку, необхідно враховувати квадратичну залежність випромінювання на вході приймального пристрою від діаметра дзеркала.

Визначимо енергію випромінювання лазера на барвнику з ламповим накачуванням з тривалістю імпульсу 33 мксек, що відповідає 5,0 км інтервалу роздільної здатності та при дотриманні умови  $I = I_s = 6,3 \text{ Вт/с м}^2$  на висоті шару напруги. Необхідно також, щоб кутовий розмір опорного джерела дорівнював  $10^{-5}$ . При цьому діаметр пучка випромінювання на висоті 100 км. становитиме приблизно 1 метр. Енергію випромінювання, очевидно, можна розрахувати за формулою:

$$E_0 = I_s \cdot S \cdot \tau_{\text{и}}, \quad (4.13)$$

де  $S$  – площа перерізу пучка.

Підставивши значення величин у формулу, отримуємо  $E_0 = 1,63 \text{ Дж}$ .

Оцінимо граничні можливості резонансного лідара по створенню «коригуючої зірки». Для цього розрахуємо кількість фотоелектронів на виході фотоелектронного перетворювача приймальної системи за допомогою лідарного рівняння 3.1 і з огляду на те, що коефіцієнт ослаблення, розрахований за формулою (4.7) дорівнює  $1/3$ . Відповідно до позначень, прийнятих раніше у розрахунках використовувалися наступні вихідні дані:

- квантова ефективність арсенід-галієвої ПЗЗ-матриці - 0,1;
- $T_A^2 = 0,5$ , що відповідає високій прозорості атмосфери (м.д.в.=20км);
- $\sigma_{ef} = 10^{-11} \text{ см}^2$  (для ширини спектра випромінювання 1пм);
- $H = 90 \text{ км}$ ;
- $\Delta z = 5 \text{ км}$ ;
- $S_{\text{пр}} = 0,8 \text{ м}^2$  (площа приймального дзеркала).

Енергія випромінювання передавача з урахуванням одноразового ослаблення при проходженні променя через атмосферу має становити  $1,63/0,7 \approx 2,3 \text{ Дж}$ . Оскільки в інтервалі 5 км поблизу максимуму концентрації міститься близько

70% загального вмісту натрію в шарі, прийmemo  $n_s(z) \cdot \Delta z = 3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ . Підставивши вихідні дані в рівняння лазерної локації та, нехтуючи фоновною складовою сигналу, отримаємо кількість фотоелектронів від однієї реалізації  $N = 6900$ .

Отримана величина сигналу майже на порядок перевищує мінімальну необхідну величину [26] і забезпечує деякий запас для похилого зондування, оскільки при цьому необхідно враховувати зменшення пропускання атмосфери та збільшення відстані до шару. Необхідно відзначити, що похибка, обумовлена статистикою фотовідліків датчика хвильового фронту при збільшенні діаметра телескопа буде знижуватися у відповідність зі збільшенням енергії прийнятого випромінювання.

## ВИСНОВКИ

За результатами проведеного в кваліфікаційній роботі аналізу та розрахунків можна зробити наступні висновки:

- лідарні системи є ефективними інструментами для безконтактного дистанційного контролю навколишнього середовища;
- резонансний лідар є ефективним інструментом для досліджень динаміки верхніх шарів атмосфери;
- для реєстрації слабких світлових потоків у приймальному пристрої резонансного лідару доцільно використовувати режим лічення фотонів;
- розрахунки, отримані в роботі, свідчать про безперспективність збільшення енергії випромінювання лазера більше граничної величини, що визначається параметрами передавача та характеристиками речовини, яка досліджується;
- розрахунки, отримані в роботі, свідчать про те, що за допомогою резонансного лідару можливо створити у натрієвому шарі на висоті порядку 100км штучну «коригуючу зірку» для виведення астрономічного телескопу на дифракційну межу.

Завдання на кваліфікаційну роботу виконано в повному обсязі.

## ПРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

- 1 Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование: Пер. с англ. – М: Мир, 1987. – 550 с.
- 2 Привалов В. Е. Параметры лидаров для дистанционного зондирования газовых молекул и аэрозоля в атмосфере : учеб. пос. / В. Е. Привалов, В. Г. Шеманин. — СПб: Балт. гос. техн. ун-т, 2001. — 56 с
- 3 Андреев Ю. М. Лидарные системы и их оптико-электронные элементы / [Ю. М. Андреев, В. Г. Воеводин, П. П. Гейко и др.] ; под общей ред. чл.-кор. РАН М. В. Кабанова. — Томск: Изд-во Институт ОА СО РАН, 2004. — 526 с
4. Лагутин М.Ф. Лазерная резонансная локация в экологии космического пространства // Радиотехника. 1996. Вып. 100/96. С. 173-187.
- 5 Зарудный А.А., Плетенев В.Г., Верхоробин А.Л. Лазер повышенной спектральной яркости для исследования атмосферы // Радиотехника. 1998. Вып. 102. С. 170-175.
- 6 Тулинов Г. Ф., Дудолодов Ю.П., Иванов М. С. и др. Техника и результаты лазерного зондирования верхней атмосферы полярной области // Ионосферные исследования. 1982. № 32. С. 104
- 7 Лакович Дж. Основы флуоресцентной спектроскопии. М.: Мир, 1986. – 496 с
- 8 Althausen D., Muller D., Ansmann A., Wandinger U., Hube H., Clauder E., Zorner S. Scanning 6– wavelength 11–channel aerosol lidar // J. Atmos. and Oceanic Technol. – 2000. – V. 17. – P. 1469–1482
- 9 Клышко Д.В. Рассеяние света // Наука и жизнь. 1988. № 1. С. 24–32
- 10 Зарудный А.А., Мегель Ю.Е., Лагутин М.Ф. Лидар для исследования мезосферной примеси // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 6. С. 83-89
- 11 Bib.convdocs [Электронный ресурс] / Флуоресцентный лидар для дистанционного зондирования каменных объектов культурного наследия – Режим доступа [https://bib.convdocs.org/v31315/парфенов\\_в.а.\\_электронный\\_конспект\\_лазерные\\_методы\\_в\\_экологии?page=7](https://bib.convdocs.org/v31315/парфенов_в.а._электронный_конспект_лазерные_методы_в_экологии?page=7) (дата звернення 28.11.21)
- 12 Иванов В. И. Многофункциональные лидарные системы / В. И. Иванов, И. А. Малевич, А. П. Чайковский. — Мн. : Университетское, 1996. — 286 с
- 13 Аршинов Ю. Ф. КР-лидар для дистанционного контроля промышленных загрязнений атмосферы / Ю. Ф. Аршинов, С. М. Бобровников // Региональный мониторинг атмосферы. Ч. 2. Новые приборы и методики измерений. — Томск : Изд-во СО РАН, 1997. С. 112—130.

14 Петрук В. Г. Спектрофотометрія світлорозсіювальних середовищ (теорія і практика оптичного вимірювального контролю) : монографія (Ч. II). / В. Г. Петрук. — Вінниця: Універсум-Вінниця, 2000. — 207 с

15 Матвиенко Г.Г., Банах В.А., Бобровников С.М. и др. Развитие технологий лазерного зондирования атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 2009. Т.22. №10. С. 915–930.

16 Лакович Дж. Основы флуоресцентной спектроскопии. М.: Мир, 1986. – 496 с

17 Лазерная система для возбуждения флуоресценции атомов натрия. Руководство по эксплуатации. Новосибирск, 2013 – 28 с.

18 Плачек Г. Релеевское рассеяние и Раман-эффект, пер. с нем., Харьков-Киев:ОНТИ НКТП, 1935. – 174 с.

19 Маричев В.Н., Бочковский Д.А. Исследование возможностей лидарных измерений температуры атмосферы Земли из космоса. // Оптика атмосферы и океана. 2014. № 10. С. 399-406

20 [Электронный ресурс] / Об'єктив Ньютона – Режим доступу [https://studbooks.net/2128814/matematika\\_himiya\\_fizika/obektiv\\_nyutona](https://studbooks.net/2128814/matematika_himiya_fizika/obektiv_nyutona) (дата звернення 19.11.21)

21 [Электронный ресурс] / Пост – Режим доступу <https://habr.com/ru/post/441706/> (дата звернення 25.11.21).

22. Захаров В. М., Костко О. К., Метеорологическая лазерная локация. .- Л.:Гидрометеиздат, 1977.-222с.

23. Laserportal [Электронный ресурс] / Флуоресцентный лидар – Режим доступу: [http://www.laserportal.ru/content\\_1003](http://www.laserportal.ru/content_1003) (Дата звернення: 22.11.21)

24. Иванов В. И. / Многофункциональные лидарные системы / В. И. Иванов, И. А. Малевич, А. П. Чайковский. — Мн: Университетское, 1996. — 286 с.

25. Зарудный А.А., Лагутин М.Ф., Кузьменко В.Н.,Тулинов Г.Ф. Резонансные лидары в глобальном мониторинге примесей верхней атмосферы. Прикладная радиоэлектроника. 2004.-№1. С.16-28.

26. Гарднер Ч.С. Применение лидара на резонансной флуоресценции натрия в атмосферных исследованиях и астрономии /Ч.С. Гарднер //ТИИЭР – 1989. - №3 (77). – С. 44-56.