

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Гідрометеорологічний інститут
Кафедра Автоматизованих систем
моніторингу навколишнього
середовища_____

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: Застосування системи комп'ютерної математики для обчислення та
візуалізації характеристик віту при радіозондуванні

Виконав студент 2 курсу групи МАГ- 18
спеціальності 103 Науки про Землю
Поляков Дмитро Сергійович_____

Керівник к.т.н., доц. _____
Гор'єв Сергій Адольфович_____

Консультант _____

Рецензент к.геогр.н., доц. _____
Лужбін Анатолій Михайлович_____

Одеса 2019

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інститут, факультет Гідрометеорологічний інститут
Кафедра Автоматизованих систем моніторингу навколишнього середовища
Рівень вищої освіти магістр
Спеціальність 103 Науки про Землю
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

“ 28 ” жовтня 2019 року

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

ПОЛЯКОВУ ДМИТРУ СЕРГІЙОВИЧУ
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Застосування системи комп'ютерної математики для обчислення та візуалізації характеристик вітру при радіозондуванні.

керівник роботи Гор'єв Сергій Адольфович к.т.н., доцент,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “ 18 ” жовтня 2019р. №235 «С»

2. Строк подання студентом роботи 10.12.2019р.

3. Вихідні дані до роботи Існуючі системи радіозондування моніторингу навколишнього середовища, ісходні дані телеметричної інформації пуску радіозонда ПАЗА-12М Одеського Гідрометцентр ЧАМ

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз методів проведення і обробки інформації вітрових спостережень кулі-пілота

2. Розрахунок горизонтальну складову швидкості руху кулі-пілота на різних висотах.

3. Розрахунок горизонтальну складову напрямую руху кулі-пілота на різних висотах.

4. Розробка програмного забезпечення моделі візуалізації просторової траєкторії польоту кулі-пілота.

5. Дослідження моделі відображення просторової траєкторії польоту кулі-пілота.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Електронна презентація магістерської роботи

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Електронна презентація магістерської роботи

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 28 жовтня 2019р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Оцінка виконання етапу	
			у %	за 4-х бальною шкалою
1	Одержання завдання на виконання магістерської роботи			добре
2	Пошук та підбір літератури та інших джерел інформації			добре
3	Проведення аналізу предметної області і написання першого розділу пояснювальної записки до магістерської роботи			добре
4	Розробка моделі в заданій предметній області і написання другого розділу пояснювальної записки до магістерської роботи			добре
5	Розробка програмного коду моделі і написання третього розділу пояснювальної записки до магістерської роботи			добре
6	Проведення дослідження розробленої моделі і написання четвертого розділу пояснювальної записки до магістерської роботи			добре
7	Виготовлення презентації			добре
8	Друкування пояснювальної записки			
9	Одержання висновку керівника магістерської роботи			
10	Проходження нормативного контролю			
11	Переплетіння пояснювальної записки			
12	Одержання рецензії			добре
13	Одержання висновку кафедри про допуск роботи до захисту			
14	Здача готової магістерської роботи і документів секретарю ДЕК			
	Інтегральна оцінка виконання етапів календарного плану (як середня за етапами)			

Студент

(підпис)

Поляков Д. С.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Гор'єв С. А.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Представлена робота Полякова Дмитра Сергійовича на тему «Застосування системи комп'ютерної математики для обчислення та візуалізації характеристик вітру при радіозондуванні».

Мета магістерської роботи – це ознайомлення з основними методами аерологічних досліджень і методами визначення характеристик вітру у вільній атмосфері.

Для досягнення зазначеної мети необхідно вирішення наступних завдань:

- ознайомитись з контактними і дистанційними методами визначення параметрів вітру
- виявити переваги і недоліки в існуючих методах
- підібрати необхідні матеріали для реалізації завдання;

У своїй магістерській роботі я розглядав основні методи визначення характеристик вітру у вільній атмосфері, провели обробку вітрових спостережень на висотах та створи модель просторової траєкторії польоту радіозонду .

Була розроблена модель польоту радіозонду по даним радіоцентра для розрахунку и створення імітаційної моделі було використано програмне забезпечення MAT LAB.

Магістерська робота містить: 78 с., рис. 14, табл. 3, додатки 10, використаних літературних джерел 26.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: зондування, радіолокація, вітер, атмосфера, спостереження, куле-пілот, методи.

SUMMARY

The topic of this thesis, made by Polyakov Dmitry Serhiyovych is "Application of computer mathematics to calculate and visualize the characteristics of a vita during radio sounding".

The purpose of the master's thesis is to get acquainted with the basic methods of aerological research and methods of determining the characteristics of wind in a free atmosphere.

To achieve this goal, you must solve the following problems:

- to get acquainted with contact and remote methods of determination of wind parameters
- identify the advantages and disadvantages of existing methods
- to select the necessary materials for the task;

In my master's thesis, I considered the basic methods of determining the characteristics of wind in a free atmosphere, performed the processing of wind observations at altitudes and created a model of the spatial trajectory of flight of the probe.

The model of flight of the probe according to the radiocenter data was developed. MAT LAB software was used to calculate and create the simulation model.

The master's thesis contains: 78 pages, fig. 14, table. 3, Appendix 10, used literature sources 26.

KEYWORDS: sounding, radar, wind, atmosphere, observation, ball pilot, methods.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 МЕТОДИ І ЗАСОБИ ВІТРОВОГО ЗОНДУВАННЯ АТМОСФЕРИ....	6
1.1 Контактні методи вивчення атмосферних вітрових полів.....	8
1.2 Дистанційні методи вивчення атмосферних вітрових полів.....	10
1.2.1 Акустичні системи вітрового зондування (содари).....	11
1.2.2 Радарні вітрові профайлери.....	12
1.2.3 Системи радіоакустичного зондування.....	14
1.2.4 Лідари.....	15
1.2.5 Когерентний доплерівський лідар.....	16
1.2.6 Некогерентний доплеровський лідар.....	20
2 МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВІТРУ У ВІЛЬНІЙ АТМОСФЕРІ.....	24
2.1 Методи отримання інформації.....	24
2.2 Підйомна сила і вертикальна швидкість куле-пілота.....	28
2.3 Основи оптичного і радіолокаційного методів вимірювання вітру у вільній атмосфері.....	33
2.4 Проведення і обробка інформації вітрових спостережень на висотах.....	38
2.5 Повітряні оболонки куле-пілотів і систем радіозондування.....	44
3 РОЗРОБКА, МОДЕЛЮВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК НАПРЯМКУ ТА ШВИДКОСТІ ВІТРУ ПО ПЕРВИННИМ ДАНИМ ПОЛЬОТУ РАДІОЗОНДА ГМ ЧАМ.....	46
ВИСНОВКИ.....	70
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	71
ДОДАТОК А. Графічна частина магістрської роботи.....	74

ВСТУП

У самих різних сферах життєдіяльності людини потрібна інформація про вітрові характеристики атмосфери. В даний час для визначення таких параметрів вітру, як його швидкість і напрямок, все більш широкого поширення набувають дистанційні методи зондування атмосфери. Перспективою розвитку засобів отримання інформації про турбулентні вітрові поля є використання радіофізичних методів, що забезпечують дистанційність і оперативність вимірювань і мають менше обмежень на просторовий і часовий дозвіл одержуваних даних, ніж вимірювання за допомогою традиційних датчиків. Точкові вимірювання вектора швидкості вітру не дають об'єктивну картину стану вітрового поля, тому виникає необхідність використовувати багатоточкове зондування. Методи дистанційного зондування в цьому випадку дозволяють досягти високої точності, не спотворюючи результати шляхом впливу на навколишнє середовище.

Вимірювання компонента вектора швидкості вітру при дослідженні атмосферної турбулентності можуть проводитися з використанням вітрових датчиків, наприклад, чашкових або акустичних анемометрів, встановлених на метеорологічних щоглах різної висоти. Разом з тим ці вимірювання мають контактний характер і не дозволяють отримати профіль вітру по висоті або його основні характеристики.

Потреба отримання даних про вітер в місцях, недоступних для установки датчиків, вимагає розвитку дистанційних методів вимірювання швидкості і напрямку вітру, які можуть забезпечувати вимірювання на значній відстані (наприклад, з літака або з космосу).

1 МЕТОДИ І ЗАСОБИ ВІТРОВОГО ЗОНДУВАННЯ АТМОСФЕРИ

Інформація про вітер і його параметри: турбулентності, поривах, зрушення і градієнтах вітру надзвичайно важлива для дуже великого числа споживачів, починаючи від метеослужб аеропортів і закінчуючи простими людьми, які планують вийти з дому. В даний час найпоширеніші засоби вимірювань вітру - анеометри, які встановлюють на щоглах різної висоти. Але ці вимірювання мають контактний характер і не дозволяють отримати профіль вітру по висоті або його основні характеристики.

Інший поширений тип приладів - радіозонди, які використовують піднімаючу оболонку з вимірювальними приладами, наповнену воднем або гелієм. Реєструючи за допомогою радіолокатора положення оболонки в просторі в різні моменти часу (або положення оболонки і доплерівську частоту за рахунок її руху), визначають швидкість вітру на різних висотах. Радіозондування в світі є досі основним засобом визначення вертикального профілю вітру. Але радіозондування, поряд з високою вартістю витратних матеріалів, має недолік, пов'язаний з рідкісною частотою випуску радіозондов (зазвичай 2-4 рази на добу). З огляду на те, що вітрове поле може змінюватися кардинально за кілька хвилин, така низька оперативність отримання вітрових даних не влаштовує багатьох споживачів.

Виходом є використання дистанційних засобів вітрового зондування, які оперативно реєструють вітрові характеристики в значних обсягах простору, і можуть завчасно попереджати про небезпечні явища. В даному огляді ми зупинимося на основних методах і засобах дистанційного визначення параметрів вітру, обговоримо фізичні основи вимірювань в кожному випадку. Особливо зупинимося на перевагах і недоліках використовуваних приладів і принципових обмеженнях всіх розглянутих засобів вітрового зондування.

В даний час є чотири основні типи дистанційних вимірювачів вітру. Це содар, які працюють на акустичних хвилях, лідари, що використовують оптичне випромінювання, радіолокатори, що випромінюють і приймають радіохвилі, і радіоакустичні системи, які комбінують акустичне і електромагнітне випромінювання. Всі дистанційні методи зондування засновані на випромінюванні хвиль, які при поширенні через атмосферу розсіюються в зворотному напрямку і реєструються приймачем. Розглянемо кожен з перелічених видів зондування [1].

1.1 Контактні методи вивчення атмосферних вітрових полів

Виміри, в яких датчик знаходиться у безпосередньому контакті з досліджуванним середовищем, називають контактними (аерологічними) методами.

Анемометри. Найбільше поширення серед методів виміру контактним шляхом отримали анемометри. Анемометр - це метеорологічний прилад, який призначається для виміру швидкості повітряного потоку, зокрема вітрів. Існує безліч різних видів анемометра, проте, найпоширеніші складаються з чашкової (чи лопастевої) вертушки, яка закріплюється на осі, сполучений з вимірювальним механізмом.

При виникненні повітряного потоку, вітер штовхає чашки і приводить їх в рух, завдяки чому вони починають крутитися навколо осі. В цей час вимірювальний механізм прочитує інформацію, аналізує і видає на дисплей значення швидкості вітру.

Анемометр використовується, в першу чергу, на метеостанціях. Крім того, такі прилади встановлюються на підприємствах, обладнаних системами кондиціонування виробничих приміщень. Анемометр використовується скрізь, де існує необхідність виміру швидкості повітряного потоку.

Залежно від конструктивних особливостей і принципу дії, виділяють декілька видів анемометрів:

- анемометр чашковий;
- анемометр крильчатий (лопастевий);
- термоанемометр (анемометр ультразвукового типу).

Чашковий анемометр. Це простий по своєму пристрою прилад для виміру швидкості вітру. Свою назву, цей анемометр отримав завдяки формі лопастей у вигляді півсфер, схожих на чашки.

Чашкові анемометри можуть вимірювати швидкість вітру лише в одній площині, перпендикулярній осі обертання. Потік повітря обертає чашки, і за швидкістю їх обертання обчислюється швидкість вітру.

Крыльчатый анемометр. Крыльчатый анемометр, також званий "лопастевий анемометр", а якщо перекладати дослівно його назва (windmill anemometer) на українську мову-"млиновий анемометр", з'явився, як результат еволюції і розвитку чашкового анемометра.

Головна відмінність крильчатого анемометра від чашкового полягає в тому, що деталь, що уловлює швидкість вітру виконана у формі вентилятора, а не у вигляді чашок. Потік повітря, потрапляючи на вентилятор, обертає лопасті і за швидкістю їх обертання вимірюється швидкість вітру.

Крыльчатый анемометр зовні може нагадувати флюгер. Він також, як і флюгер, міняє свій напрям залежно від напрямку вітру, вибудовуючись уздовж нього. Лопасті, закріплені на кінці анемометра, обертаються із швидкістю вітру. Відповідно, окрім швидкості повітряного потоку, крильчатий анемометр може визначати напрям вітру, і в цьому полягає його перевага перед чашковим анемометром.

Термоанемометр (ультразвуковий анемометр). Ультразвуковий анемометр, в порівнянні з першими двома видами анемометрів, набагато сучасніше і, тому, для інтеграції в системи автоматики найчастіше використовується такий анемометр.

Принцип роботи ультразвукового анемометра ґрунтується на вимірі швидкості звуку між передавачем і приймачем залежно від швидкості вітру. Це високоточні сучасні анемометри, призначені також для вимірювання напрямку вітру. Розрізняють двомірні і тривимірні ультразвукові анемометри. Двомірний анемометр може вимірювати швидкість і напрям тільки горизонтальних потоків повітря. Тривимірний анемометр здатний проводити виміри трьох компонент напрямку руху потоку.

Радіозонд. Інший поширений тип контактних приладів - радіозонди, які використовують оболонку, що піднімається, наповнену воднем або гелієм, з вимірювальними приладами. Радіозондування представляє найбільш точні результати безпосередніх контактних вимірів термодинамічних параметрів атмосфери на висотах від рівня землі до 35- 40 км.

Дані, що отримуються з використанням радіозонда містять інформацію про вертикальні профілі температури, вологості, швидкості і напрям вітру, а також про тиск повітря на заданих рівнях.

Для отримання інформації в атмосферу випускаються у вільний політ невеликі легкі вимірювальні прилади, забезпечені датчиками різних метеорологічних параметрів і радіопередавачем.

Такі прилади, що називаються радіозондами, піднімаються до великих висот за допомогою спеціальних латексних куль (оболонки), що наповнюються легким газом - воднем або гелієм.

Процес радіозондування здійснюється за допомогою інформаційно-вимірювальних систем, обґрунтованих на якому-небудь способі визначення просторових координат радіозонда і що включають окрім самого радіозонда різні пристрої для прийому і обробки інформації. Радіозондування досі у світі є основним засобом визначення вертикального профілю вітру. Але радіозондування, разом з високою вартістю витратних матеріалів, має недолік, пов'язаний з рідкісною частотою випуску радіозондів (звичайно 2-4 рази в добу) [1].

1.2 Дистанційні методи вивчення атмосферних вітрових полів

Нині є чотири основні типи дистанційних вимірників вітру. Це содари, які працюють на акустичних хвилях; лідары, що використовують оптичне випромінювання; радіолокатори, випромінюючі і приймаючі радіохвилі; і радіоакустичні системи, які комбінують акустичне і електромагнітне випромінювання [1].

1.2.1 Акустичні системи вітрового зондування (содари)

При акустичному зондуванні в атмосферу випромінюється пакет звукових хвиль, який при поширенні розсіюється на акустичних неоднорідностях атмосфери. Джерелом акустичних неоднородностей в атмосфері є неоднорідності поля вітру і температури, які в першу чергу пов'язані з турбулентними рухами. Відбиті звукові хвилі реєструються акустичним приймачем, розташованим, як правило, поблизу джерела випромінювання (моностатичний содар).

За часом затримки відбитого сигналу визначають дальність розсіювання R , по потужності відбитого сигналу можна судити про інтенсивність турбулентності, а по доплерівському зрушенню частоти - визначати проекцію вітру на напрям зондування.

Інтенсивність взаємодії акустичної хвилі з атмосферними неоднорідностями дуже велика, приблизно в мільйон разів сильніше, ніж для електромагнітних хвиль. Тому в результаті взаємодії відбувається не лише розсіяння хвиль, але і їх сильне поглинання і рефракція. Це призводить до того, що висота акустичного зондування зазвичай не перевищує 1000 метрів.

Гідністю содарів є їх відносна простота і невисока вартість. Вони досить надійно забезпечують вимір швидкості і напрямку вітру в діапазоні висот від 20 до 200-800 м при відносно високому вертикальному розділенні (близько 5 - 50 м).

До недоліків слід віднести те, що випромінюваний сигнал (зазвичай в діапазоні 1-10 кГц) є чутним для людського вуха і викликає неприємні відчуття у людей, тому содары рекомендується використати поза населеними пунктами. Гранична висота зондування сильно залежить від метеорологічних умов під час вимірів, знижується за наявності температурних інверсій в атмосферному пограничному шарі, при сильній турбулентності і сильних вітрах.

Виміри дуже чутливі до сторонніх звуків, тому виміри практично неможливо проводити при високому рівні фонових шумів і за наявності рідких опадів [2].

1.2.2 Радарні вітрові профайлери

Вітрові радіолокації профайлери RadarWindProfilers (RWP) використовують довгохвильову частину спектру частот. Смуги, в яких працюють типові виміри радіолокацій, складають:

1. 30-60 МГц (довжина хвилі 10м-5м);
2. 400-550 МГц (довжина хвилі 0.75-0.55м);
3. 900-1300 МГц (довжина хвилі 0.3м-0.23м);

У Росії для цілей метеозабезпечення збройних сил розроблений доплерівський вітровий радіолокаційний лідар, працюючий в діапазоні 35 ГГц (довжина хвилі 8 мм).

Фізика формування сигналу в радарах відрізняється від содарів і лідаров тим, що за час імпульсу зондування, який має масштаб 10^{-6} с, розсіювачі встигають зрушитися на декілька мікрон. В порівнянні з довжиною хвилі радіолокаторів - це нікчемна величина, тому імпульс освітлює як би застиглий в просторі ансамбль розсіювачів. Радар зазвичай випромінює пакет з декількох сотень імпульсів з періодом повторення, який пов'язаний з дальністю зондування очевидним співвідношенням:

$$R_{max} = c\tau_{повт} / 2, \quad (1.1)$$

де c - швидкість світла,

$$\tau_{повт} = 10^{-3},$$

тоді $R_{max} = 150$ км).

На фазовому детекторі приймальної системи реєструється фаза кожного імпульсу, яка змінюється від імпульсу до імпульсу за рахунок зміщення часток за час повторення. В результаті на приймачі реєструється послідовність імпульсів, що огинаюча яких і дає доплерівський сигнал. Такий режим вимірювань називають імпульсно-когерентним. Проте, при такому режимі існує обмеження іншого роду.

Пов'язано воно з тією вимогою, що за період повторення імпульсів частки не повинні зрушуватися занадто сильно. Максимально допустиме зрушення не повинне перевищувати чверть довжини хвилі радіолокатора. Це пов'язано з тим, що для того, щоб прописати синусоїду на приймачі має бути не менше двох відліків на період синусоїди. З цієї вимоги витікає умова $1/\tau_{повт} = 4V_{max}/\lambda$. Чим більше діапазон вимірюваних швидкостей, тим вищою має бути частота повторення імпульсів.

При цьому, очевидно знижуватиметься максимальна однозначна дальність зондування R_{max} . В результаті для імпульсно когерентних РЛС отримуємо наступне обмеження:

$$V_{max}R_{max} = c\lambda/8. \quad (1.2)$$

З цього співвідношення виходить, що для вимірювання високих швидкостей на великих дальностях слід вибирати як можна більшу довжину хвилі. А перехід в сантиметровий або міліметровий діапазон, який дуже привабливий з точки зору міри взаємодії випромінювання з розсіювачами, обмежуватиме або дальність, або вимірювану максимальну швидкість.

Для таких систем розсіювачами є дрібний і великий аерозоль, опади будь-якого типу і практично більшість типів хмар. Найкращі технічні показники такі вимірювачі демонструють в несприятливих погодних умовах, при сильному вітрі, в опадах, туманах, хмарності, тобто в тих умовах, коли інші типи профайлерів або не працюють, або втрачають заявлену точність.

Перевагами даних вимірювань є:

- компактність і мале енергоспоживання;
- працездатність в несприятливих і небезпечних метеоумовах;
- надійність системи: працездатність незалежно від погодних умов при температурі від мінус 40 до плюс 55 градусі Цельсія, вологості до 95% на висоті до 3000м над рівнем моря, при наземному вітрі до 30 м/с.

Недоліком міліметрових радіолокацій лідарів є - можливість пропуску вимірів із-за слабкого відбитого сигналу в спокійній метеорологічній ситуації, при ясній безхмарній атмосфері, слабкому вітрі [2].

1.2.3 Системи радіоакустичного зондування

Принцип радіоакустичного виміру швидкості вітру полягає в штучному створенні в атмосфері відбиваючої неоднорідності у вигляді звукових ґрат. Звуковий пакет лоцірують за допомогою радара, підбираючи довжину хвилі радіолокатора такій, щоб виконувалася умова Бреґа, а саме: довжина хвилі радіолокатора має бути удвічі більше довжини звукової хвилі. Швидкість поширення звукової хвилі складається зі швидкості звуку, яка визначається тільки температурою, і швидкістю вітру.

Проводячи виміри у вертикальному напрямі можна отримати профіль температури, яку потім використати для отримання швидкості вітру. Зручність радіоакустики полягає в тому, що швидкість вітру реєструється не на нульових доплерівських частотах, а на частоті, зрушеній на швидкість звуку. Це полегшує селекцію сигналу. Недоліки радіоакустики полягають в спотворенні звукових ґрат як за рахунок розсіяння на турбулентності, так і за

рахунок градієнтів вітру і сильної рефракції. В результаті зі збільшенням відстані звуковий пакет розпливається, і відбитий сигнал радіолокації різко слабшає або пропадає зовсім. З цієї причини вітер середньої сили, близько 10м/с, часто створює настільки несприятливі умови, що виміри стають неможливими [3].

1.2.4 Лідари

Умовно лідарні засоби для вітрових вимірів можна розділити на недоплерівські і доплерівські системи.

Недоплерівські виміри обгрунтовані на зміщенні максимуму взаємної просторово-часової кореляційної функції інтенсивності, отриманої на різних рівнях конуса зондування, який описує лазерний промінь в напрямі близькому до вертикалі. Фактично відбувається стеження за переміщенням неоднорідностей відбиваності в горизонтальній площині. За часом і напрямком зміщення неоднорідностей проводиться оцінка швидкості і напрямку вітру на заданій висоті зондування.

Недоліком такого методу є можливе невиконання умови стаціонарності поля відбиваності при горизонтальному переміщенні розсіювачів. При перенесенні аерозолів до іншої ділянки конуса за рахунок турбулентності і вертикальних переміщень центр тяжіння неоднорідностей зміщується не так, як середній вітер, що призводить до наростання погрішностей вимірів або неможливості їх проведення. Ймовірно, тому ці методи вітрового зондування досі не знайшли серійного застосування.

Доплерівські лідари у свою чергу бувають некогерентні і когерентні. Некогерентні доплерівські лідари реєструють сигнал розсіяний на аерозолях або молекулах повітря. Розсіяне випромінювання збирають телескопічним приймачем і аналізують на інтерферометрі. При цьому відбувається пряме детектування сигналу на різних частотах (каналах). Вимірюється доплерівське зрушення частоти прийнятого сигналу, по якому

визначають проекцію вітру на напрям зондування. При кінчному зондуванні це дозволяє визначати і швидкість, і напрям вітру на різних висотах.

Якщо розсіювання відбувається на аерозолях, то отримують досить вузький сигнал, який зручно інтерпретувати. На великих висотах, де аерозолів майже немає, основний сигнал формується при розсіюванні на молекулах повітря. Ця властивість є перевагою методу порівняно з доплерівськими лідарами, які не можуть працювати у відсутності аерозолів.

Проте, при молекулярному розсіянні спектр сигналу набагато ширший, ніж при аерозольному розсіянні, через що реєстрація доплерівського зрушення стає скрутною, і потрібно довготривале накопичення сигналу для аналізу [4].

1.2.5 Когерентний доплерівський лідар

Робота когерентного лідара побудована на наступних принципах. Лазерне випромінювання на частоті f_1 у міру поширення в атмосфері розсіюється на аерозольних частинках. З урахуванням швидкості руху цих частинок V_r (радіальна швидкість вітру) частота розсіяною назад хвилі, відповідно до ефекту Допплера, дорівнює $f_1 (1 + 2V_r / c)$, де c - швидкість світла. Розсіяне випромінювання збирається прийомним телескопом і, після змішування з полем опорного пучка на частоті f_2 , подається на детектор. Сигнал що детектується $S(t)$ матиме складову на проміжній частоті

$$f_3 = f_1(1 + 2V_r/c) - f_2 = f_1 - f_2 + fd, \quad (1.3)$$

де

$$V_r = fd\lambda, \quad (1.4)$$

де fd - доплерівське зрушення частоти,

λ - довжина хвилі.

Цією складовою відповідає пік, локалізований на частоті f_3 , в спектрі потужності сигналу.

$W(f)$, що отримується з вимірної залежності сигналу $S(t)$ від часу t . Відповідно до положення цього піку і з урахуванням можна знайти оцінку швидкості V_r .

У свою чергу серед когерентних доплерівських лідарів(КДЛ) існує два основних типи: КДЛ безперервного і імпульсного випромінювання. З усіх створених до теперішнього часу когерентних лідарів найбільшого поширення в наукових дослідженнях і в практичних додатках отримали безперервний CO_2 -когерентний доплеровський лідар з джерелом випромінювання на вуглекислому газі і довжиною хвилі 10,6 мкм і імпульсний когерентний доплерівський лідар, який працює на довжині хвилі 2 мкм, розроблений фірмою CoherentTechnologiesInc.

Вимірювання когерентними доплерівськими лідарами мають обмеження по дальності зондування, тому що залежать від умов поширення зондуючих імпульсів і їх ехосигналів в атмосфері, а саме від її розсіювальних властивостей, турбулентного стану. Якщо для безперервного CO_2 - КДЛ ці обмеження пов'язані в основному з погіршенням просторового дозволу при збільшенні фокусної відстані, то в разі імпульсних лідарів, визначальним фактором є потужність сигналу зворотного розсіювання [6].

Безперервний КДЛ. Принципова схема безперервного КДЛ (гомодинного система, тобто $f_1 = f_2$; $\lambda = 10,6$ мкм). Зондувальний лазерний пучок безперервного випромінювання фокусується на задану відстань R . Після змішування розсіяною і опорної хвиль і подачі пучка сумарною хвилі на чутливу майданчик детектора в електричному ланцюзі виникає фотострум. За допомогою спектроаналізатора отримують окремі реалізації для спектрів, які підсумовуються в інтеграторі. Потім спектри, вимірювані за певний інтегральне время t_0 , обробляються на комп'ютері з метою отримання оцінок швидкості V_r . (рис 1.1).

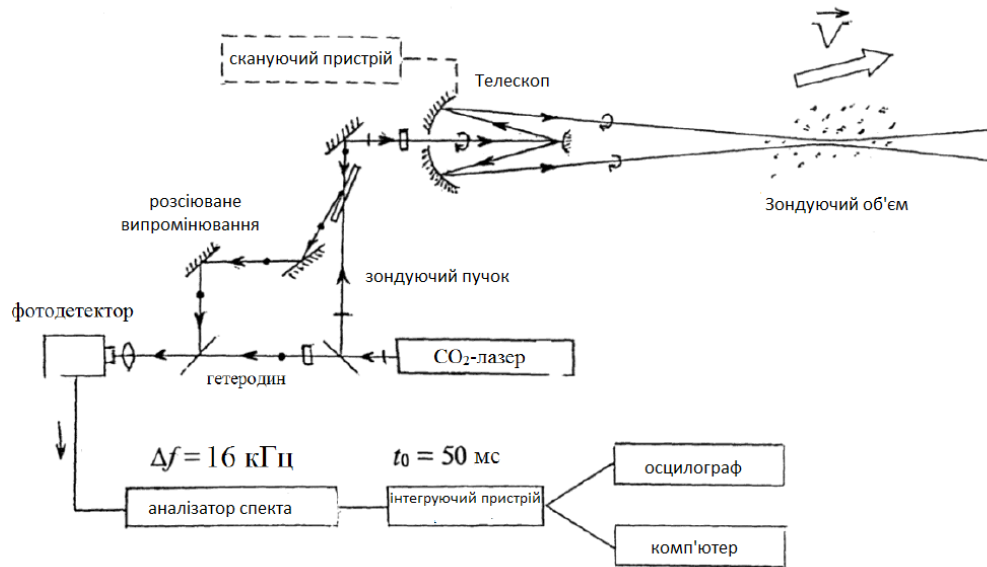


Рисунок 1.1 - Схема безперервного доплерівського лідара

Схема узгодження хвильових фронтів розсіяної і опорної хвиль така, що найбільший внесок в когерентно детектуючий сигнал буде вносити розсіювання на частинках, що знаходяться в околиці фокусу R . При цьому просторова роздільність (поздовжній розмір зондувального обсягу) Δz визначається формулою:

$$\Delta z = \frac{\lambda}{2} \left(\frac{R}{a_0} \right)^2, \quad (1.5)$$

де a_0 - початковий розмір зондувального пучка.

Безперервний КДЛ з $\lambda = 10,6$ мкм використовується на відносно невеликих трасах (як правило, $R \leq 1$ км) і тому такі наземні системи призначені для вимірювань в прикордонному шарі атмосфери. Перевагою такого лідара є можливість домагатися великих відносин сигнал/шум. До недоліків можна віднести те, що для вимірювання висотного профілю вітру необхідно для кожної зворотньої висоти змінювати фокусну відстань R . Крім того, зі збільшенням фокусної відстані R , швидко погіршується просторова роздільна здатність. Від цих недоліків стає вільним імпульсний КДЛ [7].

Імпульсний КДЛ. В імпульсних лідарах використовуються два квантових генератора, що формують опорний і зонduючий лазерні пучки. Генератор опорного пучка є джерелом безперервного лазерного випромінювання з частотою f_0 . Для формування зонduючого пучка використовують генератор імпульсного лазерного випромінювання з частотою f_1 .

Енергія імпульсу розсіюється аерозольними частками в обсязі зондування, що знаходиться на відстані R , що визначається зі співвідношення. Розсіяне випромінювання збирається прийомним телескопом і подається на сигнальний детектор разом з опорним лазерним випромінюванням. Відбувається інтерференція розсіяного і опорного пучків і на детекторі реєструється сигнал, спектр потужності якого буде локалізований навколо проміжної частоти. Положення піку спектра потужності буде визначатися середньою швидкістю руху розсіюваних випромінюванням частинок, що захоплює вітровий потік в атмосфері. Крім сигнального детектора, в лідарах є детектор випромінювання, одержуваного при змішуванні опорного і зонduючого пучків. Це робиться для того щоб контролювати різницю частот $f_0 - f_1$, інформація про яку дозволяє виділяти доплерівську частоту fd з спектра потужності сигналу, що реєструється на фотодетектор. Оцінку швидкості руху частинок в обсязі зондування отримують зі співвідношення Допплера.

На відміну від безперервного КДЛ, де ширина доплерівського спектра залежить тільки від дисперсії швидкостей руху розсіювачів в зонduючому обсязі, в разі імпульсного КДЛ, ширина спектра, крім того, буде залежати від тривалості зонduючого імпульсу σ_r . Чим менше σ_r , тим ширше спектр, і, відповідно, менш точна оцінка швидкості V_r . Когерентний лідар дозволяє, при одній посиленні імпульсу, отримати з сигналу зворотного розсіювання залежність V_r від відстані до точки зондування [8].

1.2.6 Некогерентний доплеровський лідар

При зондуванні когерентного лідара на великих висотах ($h \geq 10$ км), внаслідок дуже малої концентрації аерозолі, сигнальна складова фотоструму може бути істотно менше шумової і оцінка швидкості V_r , при використуванні в даний час енергій зондуючого імпульсу, є неможливою навіть при тривалому усередненні даних. З метою вирішення такої проблеми розроблені некогерентні доплеровські лідари, що працюють на довжинах хвиль видимого і ультрафіолетового діапазону. Ці лідари дозволяють використовувати молекулярне розсіювання на висотах, де концентрація аерозолі є недостатньою для вимірювання вітру.

Принцип роботи НДЛ заснований на використанні інтерферометра (наприклад, еталон Фабрі-Перо) в оптичній схемі приймальної системи. Відповідно до положення інтерференційних кілець в розподілі інтенсивності розсіяного світла в фокальній площині телескопа і з використанням зв'язку між довжинами хвиль зондуючого (λ_0) і розсіяного (λ) випромінювання $\lambda = \lambda_0 / (1 + 2V_r / c)$ визначають радіальну швидкість вітру V_r .

Доплеровський лідар (КДЛ або НДЛ) при фіксованому положенні осі зондуючого пучка здатний вимірювати лише радіальну складову вектора швидкості вітру (проекцію вектора на вісь пучка). Щоб отримати інформацію про швидкість і напрям вітру (векторі швидкості) необхідно провести вимірювання при різній геометрії поширення зондуючого пучка.

Порівняння методів вимірювання вектора швидкості вітру.

Таблиця 1.1 — Порівняння алгоритмів і методів виділення об'єкта на відео потоці

№	Вимірю- вальний пристрі- й	Переваги	Недоліки
1	Чашковий анемометр	Простота визначення швидкості повітря, малі габарити і вага анемометра, зручність обслуговування і простота в експлуатації, широкий діапазон виміру швидкості повітряного потоку	Наявність механічних рухомих частин, що впливають на обсяг технічного обслуговування датчика і термін експлуатації, конструктивна складність визначення складових вітру, виміру тільки швидкості вітру
2	Крильчати й анемометр	Простота визначення швидкості повітря, вимірювання швидкості і напрямку вітру	Наявність механічних рухомих частин, що впливають на обсяг технічного обслуговування датчика і термін експлуатації, конструктивна складність визначення складових вітру
3	Ультразву- ковий анемометр	Вимірювання трьох компонент вектора швидкості вітру, відсутність рухомих механічних частин	Висока вартість і складність конструкції, сильна залежність від метеорологічних умов
4	Ра- діозонд	Можливість проведення вимірювань на великих висотах, визначення вертикального профілю швидкості вітру	Висока вартість витратних матеріалів, рідкісна частота випуску, низька оперативність отримання даних
5	Содар	Відносна простота і низька вартість, висока надійність, гарний вертикальний дозвіл	Низька захищеність від перешкод, потенційна небезпека при роботі, залежність від метеорологічних умов
6	Радар	Компактність і мале енергоспоживання, надійність системи: працездатність незалежно від погодних умов, можливість практично безперервного вимірювання профілю вітру до висот 20-30	Можливість пропуску вимірювань через слабкий відбитий сигнал в спокійній метеорологічній ситуації, при ясній безхмарним атмосфері, слабкому вітрі

№	Вимірювальний пристрій	Переваги	Недоліки
		км	
7	Радіоакустична система	Хороша селекція сигналу	Спотворення звукової решітки як за рахунок розсіювання на

№	Вимірювальний пристрій	Переваги	Недоліки
			турбулентності, так і за рахунок градієнтів вітру і сильної рефракції, низька висота зондування вітру (до 1 км)
8	Недоплерівський лідар	Можливість стеження за переміщенням неоднорідностей відбиваності за часом і напрямком. Оцінка швидкості і напрямку вітру на заданій висоті	Наростання похибок вимірювань або неможливості їх проведення через вітрову турбулентність
9	Безперервний когерентний доплерівський лідар	Можливість досягнення великих відносин сигнал/шум, дистанційність і оперативність отримання даних, менші обмеження на просторовий і тимчасовий дозвіл отриманих даних, ніж вимірювання за допомогою традиційних датчиків	Обмеження дальності зондування, пов'язане в основному з погіршенням просторового дозволу при збільшенні фокусної відстані, необхідність змін фокусної відстані для кожної обраної висоти при вимірюванні висотного профілю швидкості вітру
10	Імпульсний когерентний доплерівський лідар	Дистанційність і оперативність отримання даних, менші обмеження на просторовий і тимчасовий дозвіл одержуваних даних, ніж вимірювання за допомогою традиційних датчиків	Обмеження пов'язані з потужністю сигналу зворотного зондування
11	Некогерентний	Можливість використання на	Зменшення шумової похибки оцінки швидкості

	доплерівський лідар	висотах, де концентрація аерозолі є недостатньою для вимірювання вітру	вітру, неможливо навіть при тривалому усередненні даних
--	---------------------	--	--

Продовження таблиці 1.1 – Порівняння алгоритмів і методів виділення
об'єкта на відео потоці

Можно зробити підсумок що на основі проведеного аналізу методів для вимірювання параметрів вітрової турбулентності нижньої тропосфери можна зробити висновок, що для дослідження процесів обміну в прикордонному шарі безпека польотів літаків, дифузія атмосферних домішок і інших прикладних задач, найбільш прийнятні когерентні доплерівські лідари. Використання когерентного випромінювання дозволяє реєструвати не тільки інтенсивність випромінювання, але також і його поляризацію, фазу і доплерівське зміщення, що дає додаткову інформацію [9, 2].

2 МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВІТРУ У ВІЛЬНІЙ АТМОСФЕРІ

З переміщеннями повітря в процесі загальної циркуляції атмосфери пов'язані основні зміни погоди. Повітряні маси, переміщаючись з одних областей Землі в інші, приносять різні умови по температурі, вологості і хмарності. Вітер викликає хвилювання водних поверхонь, океанічні течії, дрейф льодів, бере участь в процесах ерозії, рельєфні утворення і є найважливішим параметром для прогнозу погоди. Вітром називають рух повітря відносно земної поверхні, а вся система повітряних течій на Землі становить загальну циркуляцію атмосфери. Вихрові руху великого масштабу - циклони і антициклони, постійно виникаючі в атмосфері, роблять систему повітряних течій дуже складною. Швидкість вітру характеризує швидкість переміщенням повітря відносно земної поверхні і вимірюється в метрах в секунду (м/с), кілометрах в годину (км/год) або в вузлах, вузол - це одна морська миля (1852 метри на годину, тобто 5м/с). В наш час практично у всіх країнах світу за одиницю виміру швидкості вітру в аерологічних вимірах прийнятий метр в секунду, лише в окремих регіонах (наприклад, в Антарктиді) вітер позначається в вузлах [10].

2.1 Методи отримання інформації

Визначення параметрів вітру - одна з головних задач зондування атмосфери. Для визначення швидкості і напрямку вітру в вільній атмосфері можуть бути використані два методи: перший метод полягає в спостереженні з земної поверхні за переміщенням об'єктів, вільно захоплюємося повітряними потоками і переміщаються зі швидкостями цих потоків; другий метод полягає у вимірюванні тиску повітряного потоку на нерухоме тіло. Якщо перший метод передбачає використання випуску у вільний політ

речовин, вага яких менше ваги повітря, то в другому методі вимірювальні прилади піднімаються в вільну атмосферу за допомогою носіїв, швидкість переміщення яких в атмосфері відрізняється від швидкості повітряних потоків. При використанні першого методу об'єктами спостережень, що переміщуються зі швидкостями повітряних потоків, можуть бути об'єкти як природного, так і штучного походження. Природними об'єктами можуть бути хмари, розташовані на різних висотах, метеорні сліди, що залишаються в атмосфері після сгорання метеорів. Спостереження за рухом сріблястих хмар є важливим джерелом інформації про вітер на великих висотах. Отримання інформації про вітер у вільній атмосфері, засноване тільки на використанні природних об'єктів, носить випадковий характер, так як вони утворюються в атмосфері епізодично і не на всіх висотах, а відомості про вітер необхідні у всій товщині атмосфери. Об'єктами, штучно створеними в атмосфері з метою отримання її вітрових характеристик, можуть бути димові хмари або хмари парів натрію, що закидається на певну висоту за допомогою артилерійських снарядів або ракет. Такі штучні об'єкти дозволяють визначати вітер на заздалегідь заданих висотах [11].

Для отримання інформації про вітер в усій товщі атмосфери необхідно використати такі штучні об'єкти, які б переміщалися не лише в горизонтальному, але і у вертикальному напрямках. Такими об'єктами є куле-пілот, радіопілот, радіозонд, вільні аеростати, а також метеорологічні ракети. При використанні іншого методу найчастіше застосовуються привязні носії (привязний аеростат), з допомогою яких вимірювальні прилади утримуються деяку годину на заданій висоті, коли проводяться виміри. У оперативних умовах для отримання інформації про вітер використовують куле-пілот, радіопілот і радіозонд.

Визначення швидкості и напрямку вітру з допомогою куле-пілотів обґрунтоване на вимірі координат кулі, випущеної у вільний політ в атмосферу, за Північний Інтервал часу. Для забезпечення виміру на різних висотах куле-пілот наповнюють легким газом (Боден, гелій). Такий куле-

пілот, маючи підйомну силу, що визначена законом Архімеда, одночасно із захопленнь його повітряним потоком піднімається вгору, послідовно проходячи шари атмосфери.

За переміщенням куле-пілота із землі стежать за допомогою оптичних кутомірних приладів (аерологічних теодолітів). Залежних від числа використовуваних теодолітів розрізняють два способи шаропілотних вітрових вимірів: одноточковий (однопунктну) і базисних (двухпунктний і більше). При одноточкових вимірах у вільний політ випускається куле-пілот з відомою вертикально швидкістю (підйомною силою), яку вважають постійною в часі (по висоті).

За тимчасові інтервали між вимірами координат куле-пілота і по відомій вертикальній швидкості розраховується середня швидкість вітру і його напрямок в шарі атмосфери, товщина якого визначається вертикальною швидкістю і годиною між відліками. При базисних вимірах немає необхідності в знанні вертикальної швидкості куле-пілота.

У цьому випадку середня швидкість вітру і його напрямок в шарі можуть бути визначені аналітично тільки за результатами наземних вимірів теодолітів координат куле-пілота у функції години. Недоліком шаропілотного способу є зниження його ефективності в темний час доби і в умовах низької хмарності. При малій висоті хмар шаропілот через короткий час ховається в хмарах, і подальше спостереження становиться неможливим.

Для усунення цього недоліку необхідно переходити в таку ділянку спектру електромагнітних коливання, для якої аерозольна атмосфера прозора.

Радіопілотний спосіб вимірювання швидкості і напряму вітру полягає в тому, що випускається у вільний політ куля, наповнена легким газом, підвішується радіопередавач з джерелом живлення, що випромінює радіосигнали. Сукупність кулі і радіосигнали пристрою називається радіопілотом. За переміщенням радіопілота стежать за допомогою радіотеодоліта, що представляє собою пристрій, призначений для визначення кутових координат джерела радіосигналів в горизонтальній і вертикальній

площинах. Методика радіопілотного вимірювання вітру така ж, як і шаропілотних [12].

У зв'язку з розвитком радіолокаційних методів вимірювань координат об'єктів з'явилася можливість відмовитися від використання підвішуються до кулі радіопередавачів. Їх замінили пасивним відбивачем високочастотної енергії, випромінюваною наземною радіолокаційною станцією. Для вимірювання швидкості і напрямку вітру радіопілотним способом довжина хвилі підвішується до кулі радіопередавача або наземної радіолокаційної станції вибирається в такій ділянці спектра електромагнітного випромінювання, для якого атмосфера і її утворення є прозорими. Наприклад, сучасні наземні радіолокаційні станції, що застосовуються при вітрових вимірах, працюють в метровому і дециметровому діапазонах хвиль. Основною перевагою радіопілотного способу вимірювання швидкості і напрямку вітру в порівнянні з шаропілотними є його незалежність від часу доби і метеорологічних умов, а недоліком - необхідність використання щодо складної радіотехнічної апаратури.

Різновидом радіопілотного способу є комплексний спосіб, сутність якого полягає в тому, що вимірювання швидкості і напрямку вітру проводиться в комплексі з вимірами метеорологічних елементів вільної атмосфери (температури, вологості і тиску). При проведенні радіозондування атмосфери до наповненої легким газом кулі підвішується радіозонд, що представляє собою прилад, що вимірює метеоеlementи, і радіопередавальний пристрій. Результати вимірювань по радіоканалу передаються на наземний пункт. Наземна апаратура системи радіозондування здійснює прийом інформації та одночасно визначає координати радіозонда в момент вимірювань радіолокаційним способом. Результати вимірювань координат радіозонда використовуються для отримання даних про висоту і вітер [13].

2.2 Підйомна сила і вертикальна швидкість куле-пілота

Найбільш поширеним способом визначення вітру є спостереження за повітряною кулею еластичною, зазвичай гумовою оболонкою, наповненою газом легше повітря. На швидкість підйому кулі впливають різні сили, значення яких залежить від його розміру, властивостей газу і атмосферних умов. Оболонка куле-пілота по мірі наповнення її воднем або гелієм розтягується і набуває сферичної форми. Тиск газу всередині оболонки перевищує тиск навколишнього повітря, тобто виникає так зване супертиск, який врівноважується пружними силами оболонки. Відповідно до закону Архімеда, всяке тіло, занурене в рідину (повітря), втрачає у вазі стільки, скільки важить об'єм повітря, витісненого цим тілом. Отже, на наповнену легким газом (воднем або гелієм) оболонку буде діяти деяка виштовхуюча сила. Якби оболонка не мала маси, ця сила була б рівна різниці між масою витісненого кулею повітря (архімедовою силою) і масою водню. Ця різниця називається повною підйомною силою кулі або вантажопідйомністю оболонки. Якщо ми позначимо об'єм кулі через V (м³), питому масу (щільність) повітря через ρ_B (г / м³) і питому масу водню через ρ_H (г / м³), а повну підйомну силу через E , то:

$$E = \rho_B V - \rho_H V. \quad (2.1)$$

Різниця щільності повітря і водню ($\rho_B - \rho_H$) є не що інше, як повна підйомна сила, віднесена до одиниці об'єму, т. Е. Питома підйомна сила, яку ми позначимо через e . Тоді:

$$e = \rho_B - \rho_H. \quad (2.2)$$

При нормальних умовах (тобто при $p=1000$ гПа и $t=0^\circ\text{C}$) $\rho_B = 1293$ г/м³, $\rho_H = 90$ г / м³, $e = 1203$ г.

Щільність гелію = 180 г/м³ і відповідно $\rho_{\text{He}}=1113\text{г}$. Питома підйомна сила гелію на 7,5% менше питомої підйомної сили водню. Однак оболонка має свою масу або несе вантаж (радіозонд, мішень, ліхтарик). Позначимо масу оболонки з вантажем через B . Різниця між повною підйомною силою E і масою B називається вільною підйомною силою кулі. Позначимо її через A .

$$A = E - B \quad \text{або} \quad A = \rho_B V - \rho_H V - B. \quad (2.3)$$

При підйомі кулі зовнішній тиск зменшується, і тиск газу, що знаходиться в оболонці, змушує її розтягуватися. Внутрішній зверху тиск весь час врівноважується пружними силами оболонки [14].

Покажемо, що вантажопідйомність кулі з висотою не змінюється. Будемо вважати, що тиск газу всередині кулі приблизно дорівнює тиску повітря зовні, а температура газу дорівнює температурі повітря.

Вертикальна швидкість куле-пілота. Вільна підйомна сила A надає кулі прискорення, завдяки якому випущений в вільний політ куля рухається вгору. Як тільки куля починає підйом, на нього починає діяти сила опору повітря F , спрямована вниз. Опір повітря F зростає до тих пір, поки не стане рівним A . На рис.1.1 показано зміну співвідношення F і A в міру руху кулі вгору. Поки A більше F , куля буде підніматися з ускоренням. Коли F стає рівним A , рух кулі вгору продовжується з постійною вертикальною швидкістю $w=\text{const}$. Постійність вертикальної швидкості - допущення методу шаро- пілотних спостережень (рис.2.1).

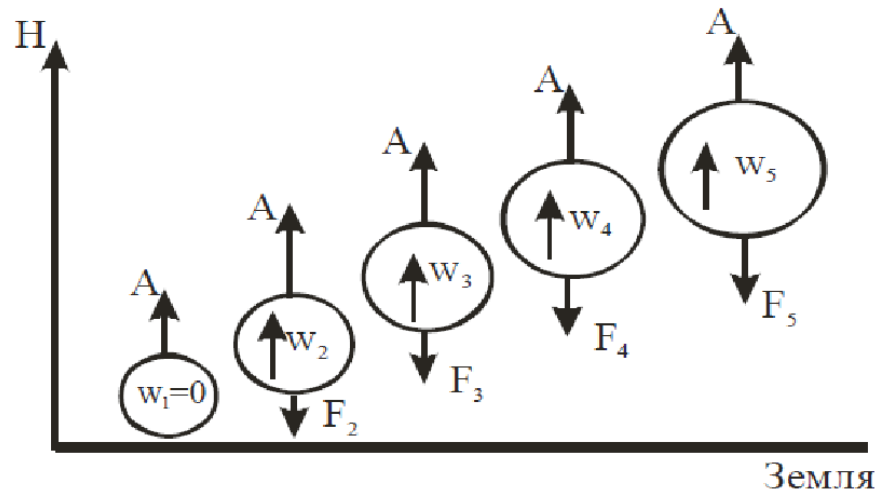


Рисунок 2.1 - Зміна сили опору F при підйомі куле-пілота ($F_5 = A$)

Опір повітря залежить від розмірів кулі, стану атмосфери, щільності повітря ρ і вертикальної швидкості w (м / хв):

$$F = k \rho c^2 w^2, \quad (2.4)$$

тут k - коефіцієнт опору куле-пілота, залежить від турбулентності атмосфери,

c - довжина кола, см.

Так як $F = A = \text{const}$, то:

$$A = k \rho c^2 w^2, \quad (2.5)$$

звідки

$$w = \sqrt{\frac{1}{k} \frac{1}{\sqrt[3]{\frac{6\rho^3}{n} \sqrt{A+B} \sqrt[3]{\frac{1}{\rho_3} \sqrt{\rho_3}}}}} = \frac{\sqrt{A}}{\sqrt[3]{A+B} \sqrt[6]{\rho_B}} \frac{\sqrt[6]{\rho_{B0}}}{\sqrt[6]{\rho_B}} \frac{1}{\sqrt{k} \sqrt[3]{\frac{6\rho^2}{n}}}.$$

(2.6)

Якщо у виразі вище постійні множники об'єднати в коефіцієнт, отримаємо формулу:

$$b = \frac{1}{\sqrt{k} \sqrt[3]{\frac{\pi^2}{n}} \sqrt[6]{\rho_{B0}}},$$

$$w = \frac{b\sqrt{A}}{\sqrt[3]{A+B}} \sqrt[6]{\frac{\rho_{B0}}{\rho_B}}.$$
(2.7)

Формула вище проста для розрахунку w , так як масу оболонки і коефіцієнт b можна визначити заздалегідь. Для визначення w досить знайти A , що робиться при наповненні кулі. Реальні умови руху кулі-пілота. Вище вказувалося основне допущення - вертикальна швидкість кулі постійна. Однак в реальній атмосфері існує цілий ряд факторів, що впливають на умови руху кулі і відхиляють фактичну вертикальну швидкість від розрахованої [15].

Зменшення щільності повітря з висотою. Згідно (2.8) відношення вертикальної швидкості на деякій висоті n до початкової w_1 становить:

$$\frac{w_n}{w_1} = \frac{c_1 \sqrt{\rho_{B1}}}{c_n \sqrt{\rho_{Bn}}} = \frac{\sqrt[3]{V_1}}{\sqrt[3]{V_n}} \frac{\sqrt{\rho_{B1}}}{\sqrt{\rho_{Bn}}}.$$
(2.8)

З огляду на те, що обсяг оболонки обернено пропорційний щільності повітря, отримаємо:

$$\frac{w_n}{w_1} = \frac{\sqrt[3]{\rho_{Bn}} \sqrt{\rho_{B1}}}{\sqrt[3]{\rho_{B1}} \sqrt{\rho_{Bn}}} = \frac{\sqrt[6]{\rho_{B1}}}{\sqrt[6]{\rho_{Bn}}} . \quad (2.9)$$

З рівняння (2.9) видно, що зі зменшенням щільності вертикальна швидкість кулі зростає. Це зростання можна розрахувати для середнього розподілу щільності повітря з висотою:

H, км	0	4	8	10	20,
wn / w1	1,00	1,08	1,15	1,19	1,52.

Однак розрахована швидкість в реальній атмосфері не завжди буде збігатися з істинною швидкістю кулі через додаткові причини.

Дифузія водню через оболонку. Внаслідок дифузії водню через оболонку кількість газу в ній зменшується, що призводить до зменшення вантажопідйомності і відповідно - вертикальної швидкості. Як правило, дифузія водню мала і нею можна знехтувати.

Відчутна втрата водню спостерігається в тих випадках, якщо в оболонці утворився отвір, це призводить до різкого зниження швидкості підйому. Зазвичай такі спостереження бракуються.

Різниця тиску водню і тиску повітря (зверх тиск газу в кулі). Зверх тиск газу в оболонці стає відчутним лише на висотах більше 10 км, поблизу стелі підйому куль-пілотів. Як показують розрахунки, зверх тиск збільшує w.

Різниця температур водню і повітря. Якщо температура водню вище температури повітря, вантажопідйомність зростає, якщо водень холодніше повітря - убиває. Як показали експерименти, ця різниця мала і нею можна знехтувати у всіх випадках, за винятком потужних інверсій повітря в атмосфері.

Відхилення форми кулі від сферичної призводить до зменшення вертикальної швидкості, так як неправильна форма кулі збільшує опір повітря. Теоретично вплив цього фактора врахувати неможливо.

Турбулентність і вертикальні потоки в атмосфері. Це одна з основних причин, що призводять до значних відхилень дійсної вертикальної швидкості від розрахованої. При значній турбулентності атмосфери коефіцієнт k зменшується.

При наявності великих висхідних або низхідних потоків повітря в атмосфері за рахунок конвекції різниця дійсної і розрахованої швидкості велика [16].

2.3 Основи оптичного і радіолокаційного методів вимірювання вітру у вільній атмосфері

Сутність шаропілотного методу полягає у визначенні траєкторії куле-пілота, який під впливом заданої йому підйомної сили піднімається вгору, одночасно зміщуючись по горизонталі, і захоплюється повітряними течіями. Горизонтальна проекція траєкторії кулі дає можливість визначити швидкість і напрям вітру в різних шарах атмосфери. Спостереження за переміщенням куле-пілота ведуться за допомогою приладів візуально (оптичні методи) або за допомогою радіолокатора (радіолокаційні методи). Для побудови проекції кулі в заданий момент часу потрібно знати його азимут і горизонтальне віддалення. Щоб судити про висоту шару, в якому визначаються швидкість і напрям вітру, необхідно знати висоту кулі в задані моменти часу. Для визначення положення кулі зручна система координат, яка містить дві кутові координати кулі (горизонтальний кут або азимут і вертикальний кут або кут місця) і одну лінійну координату, якої може бути або висота кулі H , або відстань від пункту спостережень до кулі - похила дальність r (рис.2.2).

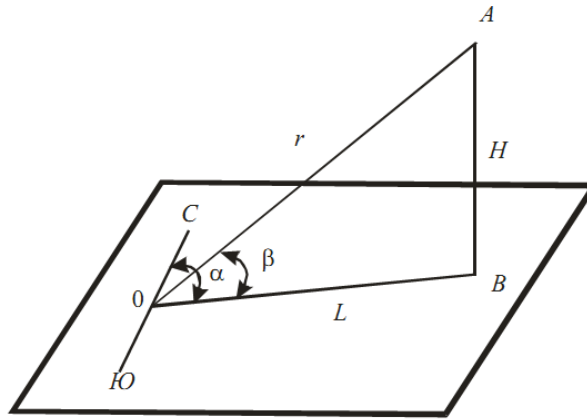


Рисунок 2.2 – Шаропілотний трикутник

На рис. 2.2 зображений шаропілотний трикутник OAB , де точка O - пункт спостереження або місце випуску кулі; точка A - місце розташування кулі; точка B - проекція кулі на площину, що проходить через точку O ; $ЮО$ - меридіан, що проходить через точку O . В цьому випадку $AB = H$ - висота кулі, $OB = L$ - горизонтальне видалення кулі, $OA = r$ - похила дальність, кут - азимут, тобто кут, утворений лінією OB з меридіаном, кут - вертикальний кут, утворений лінією OA з горизонтальною площиною, що проходить через точку O .

Положення об'єкта (радіозонда), що знаходиться в точці C , однозначно визначається наступними трьома координатами:

- похилій дальністю r , т. Е. Відстанню між станцією і об'єктом по прямій;
- азимутом α , т. Е. Кутом між лінією відліку $C-O-Ю$ і напрямком на об'єкт в горизонтальній площині (азимут називається істинним, якщо відлік проводиться за годинниковою стрілкою від північного меридіана);
- кутом місця β , т. Е. Кутом між напрямком на об'єкт (r) і проекцією цього напрямку на горизонтальну площину (L).

Поняття похилої дальності введено для того, щоб розрізняти відстань між станцією (РЛС) і об'єктом по прямій лінії і відстань уздовж поверхні землі, яке з цієї ж причини називається горизонтальною дальністю.

Відлік азимута виробляються від лінії С-О-Ю за годинниковою трелке в межах від 0 до 360 ° або в двох напрямках - за годинниковою стрілкою і проти неї. Кути, відлічувані по чаов стрілкою, вважаються позитивними, проти годинникової стрілки - негативними.

Кут місця відраховується від горизонтальної площини вгору і вниз, його значення можуть лежати в межах від 0 до $\pm 90^\circ$. За позитивний напрямок відліку кута місця прийнято напрямок вгору від горизонтальної площини, за негативне - вниз. Метеорологічні і аерологічні РЛС завжди встановлюються на деякій висоті над поверхнею землі, тому вони можуть працювати і при негативних значеннях кута місця.

Похила дальність, азимут і кут місця визначаються РЛС безпосередньо, без будь-яких додаткових перерахунків. У цьому полягає головна перевага сферичної системи координат.

Висота H - найкоротша відстань від об'єкта до горизонтальної площини, що проходить через РЛС, визначається за відомим з тригонометрії співвідношенню:

$$H = r \cdot \sin(\beta). \quad (2.10)$$

В окремих випадках важливо знати значення горизонтального дальності:

$$L = r \cdot \cos(\beta). \quad (2.11)$$

Практично для обчислення висоти за даними r і β користуються формулою, яка враховує кривизну Землі:

$$\sin(\beta) = \frac{H}{r} - \frac{r}{2 \cdot R_3}, \quad (2.12)$$

де R_3 — радіус Землі, рівний 6370 км.

Якщо в результаті спостережень виходить ряд послідовно визначених координат кулі, то швидкість і напрям вітру обчислити не складно. Направимо вісь OX (рис. 2.3) по меридіану на північ, а вісь OY - по паралелі на схід. Нехай спрямований відрізок AB зображує вектор швидкості вітру з в розглянутому шарі. Розкладемо цей вектор на дві складові: u по осі OX і v по осі OY . Тоді значення швидкості можна визначити за формулою:

$$\vec{c} = \sqrt{u^2 + v^2} . \quad (2.13)$$

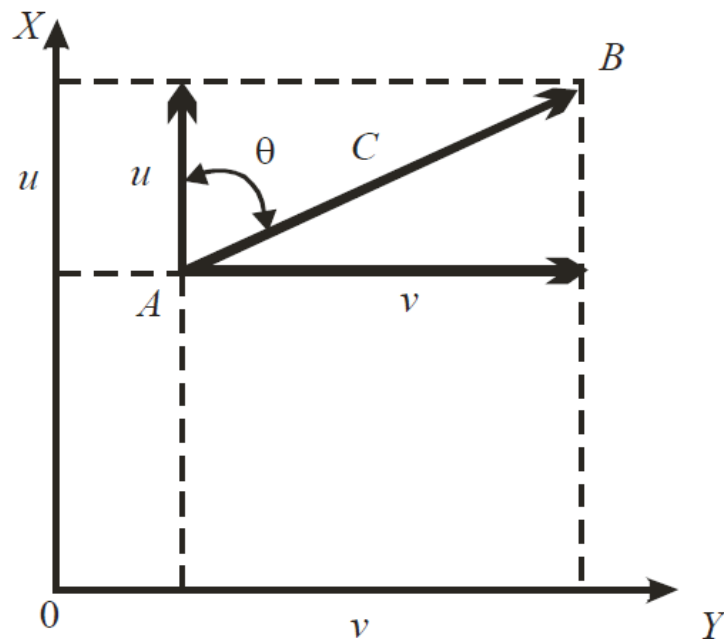


Рисунок 2.3 - Меридіональна і зональна складові швидкості вітру

Напрямок, куди дме вітер, визначається кутом Θ

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{v}{u} , \quad (2.14)$$

звідки

$$\theta = \arctg \frac{v}{u}. \quad (2.15)$$

Напрямок, звідки дме вітер, можна отримати додаванням 180° до кута 0° . Застосування ПК дає можливість виводити обчислення швидкості і напрямку вітру в процесі спостереження за кулями-пілотами за формулами, наведеними нижче [17].

Прямокутні координати x, y, z куле-пілота пов'язані з координатами r, α, δ (званими сферичними) (рис.2.4).

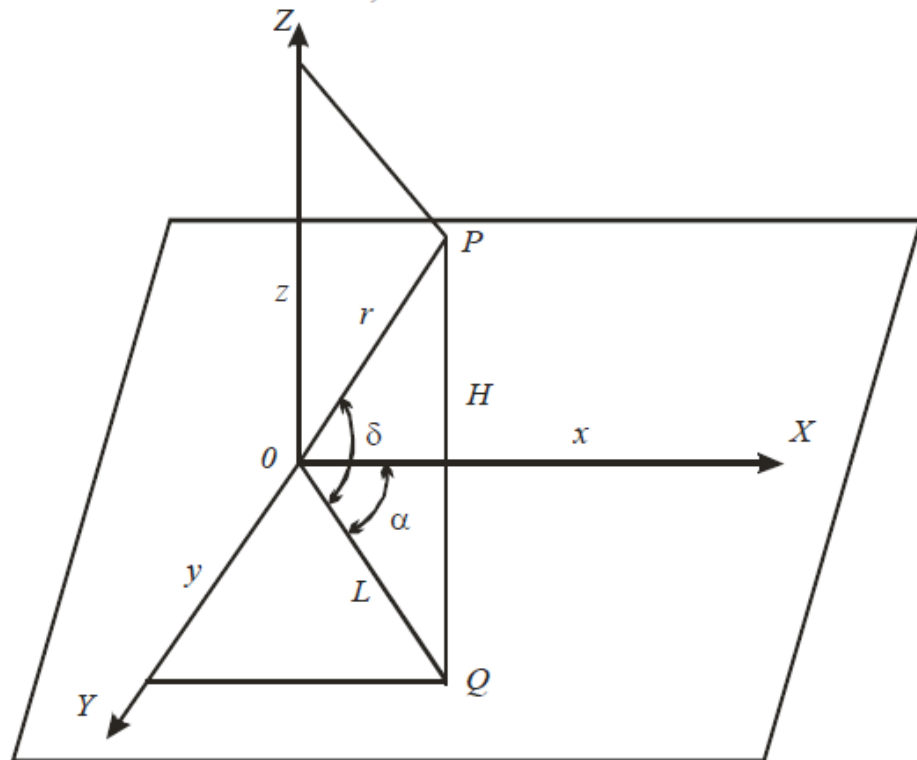


Рисунок 2.4 - Зв'язок сферичних і прямокутних координат

Відомо, що складові u, v миттєвої швидкості в точці є похідні відповідних горизонтальних координат кулі, тобто:

$$u = \frac{dx}{dt}, \quad v = \frac{dy}{dt}. \quad (2.16)$$

Середні значення компонентів швидкості за проміжок часу Δt виразяться як відносини кінцевих різниць Δx і Δy до Δt , так що:

$$u = \frac{\Delta x}{\Delta t}, \quad v = \frac{\Delta y}{\Delta t}. \quad (2.17)$$

В даний час розроблені алгоритми для визначення вертикальних профілів вітру в атмосфері. Обчислення значно спрощуються, якщо звернутися до графічних побудов, тобто нанести проекцію траєкторії кулі на горизонтальну площину і потім розглянути відрізки, що з'єднують ці проекції. Тоді відрізок у відповідному масштабі дасть значення швидкості вітру, а напрямок відрізка - напрямок вітру. Знайдені швидкості будуть середніми для відповідного шару, розташованого між висотами H_i і $H_i + 1$ (їх умовно відносять до середини шару H) [18].

2.4 Проведення і обробка інформації вітрових спостережень на висотах

Однокрапкові (однопунктні) шаропілотні спостереження. Метод куле-пілотів, які спостерігаються з одного пункту, є найбільш простим методом вимірювання швидкості і напрямку повітряних течій у вільній атмосфері. Методика і порядок виробництва шаропілотних спостережень з одного пункту викладені в повчанні гідрометеорологічним станціям і постам. Стеження за польотом кулі в просторі проводиться за допомогою спеціальних аерологічних теодолітів. При цьому вимірюються вертикальний і горизонтальний кути, під якими видно куля в певні моменти часу. При обробці одноточкових (однопунктних) шаропілотних спостережень передбачається, що вертикальна швидкість кулі постійна. Це дозволяє обчислювати висоту шаропілота для кожного моменту часу, щодо якого проводяться відліки кутів. Відлік робляться через 0,5 або 1 хв. По висоті кулі, вертикальному і горизонтальному кутах знаходяться проекції кулі на горизонтальну площину. За горизонтальним проекція кулі для послідовних

моментів часу визначаються швидкість і напрям вітру в шарі атмосфери. Для виробництва шаропілотних спостережень необхідні газ для їх наповнення, спеціальні аерологічні теодоліти для вимірювання кутових координат і планшет для графічної обробки результатів вимірювань. Для однопунктних шаропілотних спостережень застосовуються латексні оболонки №10, 20, 30. Чим більше номер оболонки, тим більше вертикальна швидкість і можлива висота підйому. Розмір оболонок підбирається з урахуванням швидкості вітру і спостерігається в момент випуску хмарності. З огляду на те, що куля з малою вертикальною швидкістю при сильному вітрі може швидко зникнути з поля зору спостерігача, оболонки №10 вживаються тільки при слабкому вітрі і низької хмарності. Оболонки №20 випускаються при хмарах середнього ярусу і швидкості вітру менше 10м/с. Оболонки №30 застосовуються для досягнення великих висот при ясній погоді, при хмарах верхнього або середнього ярусу і сильному вітрі[19].

Проведення шаропілотних спостережень. Перед випуском кулі слід підготувати теодоліт - встановити його на тринозі, вирівняти по рівнях, орієнтувати до сторін світу; для запису відліків підготувати книжку КАЕ-1. Потім слід наповнити оболонку і визначити вертикальну швидкість кулі. Перед випуском оболонки спостерігач спрямовує зорову трубу теодоліта в ту сторону, куди буде нестися куля. За 5 хв до випуску виробляються метеорологічні спостереження. У книжці КАЕ-1 записується тиск, температура і вологість повітря, швидкість і напрямок вітру біля землі, кількість і форма хмар, час випуску. Після випуску спостерігач наводить трубу теодоліта на кулю за допомогою мушки і цілика, потім, коли куля-пілот потрапить в поле зору труби теодоліта, мікрометренними гвинтами проводиться точна наводка. Перші 3 хв після випуску кулі відліки кутів виробляються через 0,5 хв, далі через 1 хв, щоб отримати більш детальні відомості про вітер в прикордонному шарі атмосфери. Спостерігач виробляє відлік вертикального, потім горизонтального кута з точністю до 0,1 °. Спостереження ведуться до тих пір, поки кулю-пілот видно в теодоліт, і

припиняються тільки тоді, коли він увійшов в хмару, лопнув, став невидимий через туман, опади, злиття з фоном. При входженні в хмару куля починає паморочитися, і цей момент відзначається з точністю до 1 с. По ньому визначають нижню межу хмар. Для спостережень в темний час доби до кулі-пілотові за допомогою шпагату довжиною 1,5-2 м підвішується електричний обертається ліхтарик. Маса ліхтарика враховується при визначенні вертикальної швидкості куле-пілота [20].

Методи визначення підйомної сили і вертикальної швидкості куле-пілота. Метод одноточкових спостережень заснований на припущенні сталості вертикальної швидкості куле-пілота. З цією метою обрані стандартні вертикальні швидкості 200 і 240 м/хв, для яких за допомогою формул, наведених раніше, розраховані норми наповнення оболонки в залежності від її маси або діаметра при стандартних умовах, т. Е. При температурі 20 ° С і тиску 1013 гПа (760 мм). Ці норми дані в повчанні у вигляді таблиць, в яких для конкретної маси оболонки наведено значення вантажопідйомності кулі.

Відхилення реальних наземних умов від стандартних враховується в цих таблицях за допомогою коефіцієнта.

$$\sqrt[6]{\frac{\rho_0}{\rho}}, \quad (2.18)$$

де ρ_0 - щільність повітря при стандартних умовах,

ρ - щільність повітря в реальних умовах випуску куле-пілота.

Визначивши за допомогою таблиць вантажопідйомність, слід відповідно їй наповнити оболонку. Наповнення здійснюється через шланг, підключений до балона за допомогою спеціального штуцера з набором важків, що входять в комплект ШК-50. Загальна маса важків дорівнює обчисленої вантажопідйомності. Штуцер має клапан для відведення водню з оболонки. Норма наповнення кулі визначається за допомогою важків, що входять в комплект. У деяких випадках кулі наповнюють до нестандартної

вертикальної швидкості. У цьому випадку швидкість підйому можна визначити по масі оболонки і вантажопідйомності або по довжині кола і вантажопідйомності оболонки за таблицями настанови. Довжина кола оболонки вимірюється спеціальною мірною стрічкою, а її вантажопідйомність - важками комплекту ШК-50 [21].

Обробка шаропілотних спостережень. Обробка шаропілотних спостережень полягає у визначенні швидкості і напрямку вітру на різних висотах по горизонтальних проекції куле-пілота. Для побудови проекцій кулі в даний момент часу необхідно знати його азимут (горизонтальний кут) і горизонтальне видалення.

Азимут кулі відрховується безпосередньо по горизонтальному колу теодоліта при наведенні на кулю. Горизонтальне видалення L обчислюється за формулою:

$$L = H \operatorname{ctg} \beta, \quad (2.19)$$

де H — висота кулі,

β — вертикальний кут.

Горизонтальні видалення визначається для кожного моменту відліку кутів. За значеннями горизонтального видалення и азимута будується Траєкторія Кулі. Висота Кулі $H = wt$, де w - вертикальна швидкість, а t - час. За відрізках, что з'єднує шкірні пару сусідніх проекцій кулі, можна судити про направлення и швідкості вітру в шарі, пройдений кулею за годину між двома послідовнімі відліками. На рис. 1.5 точки A_1 , A_2 , A_3 и A_4 представляються положення куле-пілота в просторі для тих моментів спостереження, за якими проводитися обробка (для 1, 2, 3 і 4 хвилини спостережень); точки B_1 B_2 , B_3 и B_4 - проекції куле-пілота на горизонтальну площину в ті ж моменти; H_1 H_2 , H_3 і H_4 -висоти кулі; L_1 L_2 , L_3 и L_4 - горизонтальні віддалення кулі (рис 2.5).

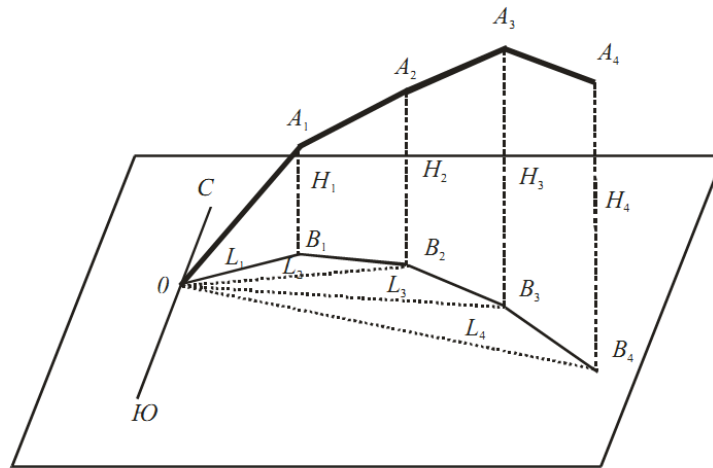


Рисунок 2.5 - Проекція куле-пілота на горизонтальну площину

По відрізках OB_1 , B_1B_2 , B_2B_3 і B_3B_4 можна судити про напрямки і середніх швидкостях вітру в шарах, що проходить куля в проміжки часу між послідовними моментами, за якими проводиться обробка. Отримані дані про вітер відносяться до рівня, розташованого на середині відповідного шару [22].

Обробка даних спостережень за кулею-пілотом проводиться в такому порядку:

- визначають вертикальну швидкість куле-пілота;
- обчислюють висоти куле-пілота для моментів відліків і висоти центрів шарів над поверхнею землі і рівнем моря;
- обчислюють висоту хмар;
- наносять проекції кулі на коло планшета А-30;
- визначають швидкості і напрямку вітру між проекціями куле-пілота;
- обчислюють швидкості і напрямку вітру для стандартних рівнів.

Графічна обробка шаропілотних спостережень проводиться за допомогою аерологічного планшета А-30, що має форму кола. На планшеті А-30 виконують кілька операцій: графічно обчислюють горизонтальне видалення куле-пілота, в деякому масштабі будують горизонтальну проекцію його шляху, визначають швидкість і напрям вітру в різних шарах атмосфери. Планшет складається з трьох частин: самого планшета з номограми,

рухомого прозорого кола зі шкалою і рухомої лінійки. Коло являє собою місцевість, над якою переміщається куле-пілот, причому центр кола відповідає пункту спостереження. На колі нанесені поділки від 0 до 360 °, напрямом на північ відповідає нульової поділки на колі, на схід - 90 °, на південь-180 ° і на захід- 270 °. Коло служить для нанесення на ньому проєкцій куле-пілота за допомогою лінійки і кутових розподілів кола, які відповідають розподілам горизонтального кола теодоліта (азимуту). Для графічного визначення горизонтального видалення куле-пілота служить номограма, розташована в правому верхньому куті планшета. Ця номограма є сімейство кривих, побудованих за рівнянням. Значення вертикального кута змінюються від 0 до 90 °. Кожна крива номограми відповідає в прийнятому масштабі горизонтальному видаленню куле-пілота для певної висоти при різних значеннях вертикальних кутів. Криві нанесені до висоти 2000 м через 100 м, від 2000 до 6000 м через 200 м і від 6000 до 9000 м через 500 м і оцифровані в одиницях висоти, виражених в сотнях метрів.

Для графічного визначення горизонтального видалення куле-пілота слід встановити рухому лінійку так, щоб її край проходив через центр діаграми і кутовий розподіл, рівне відліку вертикального кута. Тоді відстань від центру до точки перетину краю лінійки з кривою, що відповідає висоті кулі, є горизонтальним видаленням кулі.

Інша частина планшета заповнена сіткою квадратів зі сторонами, рівними 2 мм. Сітка служить для визначення швидкості вітру. Криві і сітка накреслені в масштабі 1: 30000, тобто одна поділа сітки відповідає 60 м. Таким чином, якщо цей відрізок є проєкція шляху, пройденого кулею за 1 хв, то він зображує швидкість вітру, що дорівнює 1 м/с . Обробка шаропілотних спостережень за допомогою планшета А-30 зводиться до нанесення на целулоїдне коло проєкцій куле-пілота і визначенню за цими проєкціями швидкості і напрямку вітру [23, 25].

Побудова проєкції куле-пілота проводиться таким чином: край лінійки, що проходить через центр кола, встановлюють на розподіл, що відповідає

відліку вертикального кута; зберігаючи лінійку в цьому положенні, підводять до краю, встановленому на вертикальний кут, розподіл обертового целулоїдного кола, відповідне відліку горизонтального кута. У місці перетину краю лінійки з кривою висоти, відповідної оброблюваної хвилині, ставиться зарубка і нумерується оброблюваної хвилиною. При обробці спостережень, в перші хвилини, зарубки можуть розташовуватися дуже близько. В цьому випадку масштаб збільшують в кілька разів (від 2 до 10). У стільки ж разів слід збільшити і значення висот. Якщо точки не вкладаються на колі в обраному масштабі, то масштаб зменшують. При переході до нового масштабу останню крапку наносять двічі - в старому і новому масштабах. Для визначення швидкості і напрямку вітру рухливий коло повертають так, щоб відрізок, що з'єднує дві сусідні точки, був паралельний лініях сітки, і відраховують напрямок вітру в градусах за шкалою рухомого кола. Значення швидкості вітру визначається числом поділів сітки, які вмістилися між послідовними точками. Сітка розрахована для інтервалу часу між відліками, рівного 1 хв, тому незалежно від зміни масштабу при нанесенні точок через 0,5 хв кількість поділів множить на 2, а при нанесенні через 2 хв - ділиться на 2. Знайдені швидкість і напрям вітру відносяться до середини кожного шару [24].

2.5 Повітряні оболонки куле-пілотів і систем радіозондування

Для підйому в атмосферу вимірювальної апаратури застосовуються повітряні кулі або оболонки, наповнені газом легше повітря. Спочатку використовувалися нерозтяжні оболонки з паперу, промасленого шовку та інших матеріалів. В даний час для шаропілотних і радіозондових підйомів використовуються еластичні оболонки, що виготовляються з вулканізованого гумового латексу. Такі оболонки мають велику висоту підйому, ніж нерозтяжні, і їх виготовлення і використання простіше, ніж останніх. Іноді

оболонки називають балонами, а підйом приладів на оболонках - балонним зондуванням.

При підйомі еластичних оболонок в верхні шари, тобто при зменшенні зовнішнього тиску, вони рівномірно розтягуються без розвитку значних пружних сил, причому лінійне розтягнення латексної плівки може досягати 700%. Відзначимо, що латексні оболонки мають достатню міцність і малу газопроникність. Форма латексних куль в розтянутому стані близька до сферичної, що забезпечує відносну сталість швидкості підйому. Вони порівняно стійкі до впливу низьких температур, озону і ультра фіолетової радіації. Свої властивості оболонки зберігають при тривалому зберіганні. Латексна шаропілотних або радіозондова оболонка має форму еліпсоїда з трубчастим відростком (апендиксом), що служить для її наповнення і підв'язування вантажу. Для додання йому необхідної міцності апендикс роблять з матеріалу в 10-20 разів більше товстого, ніж основна оболонка. Оболонки виготовляються різних розмірів, маси і забарвлення. Їх розрізняють по довжині діаметра в незаповненому стані і відповідно до цього дають умовні номери (табл. 2.1) [26].

Таблиця 2.1 Основні параметри латексних оболонок

№ Оболонки	Маса, г	Діаметр, см		Вертикальна швидкість м/хв	Висота підйому км
		початковий	розривний		
10	10 ± 5	10	50	130–140	3
20	35±5	20	100	200–220	7
30	85±10	30	150	230–240	13
100	400 ± 50	90–100	450	250–450	15
150	900 ± 50	140–150	600	280–320	26
200	1600±100	190–210	850	320–350	28

3 РОЗРОБКА, МОДЕЛЮВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК НАПРЯМКУ ТА ШВИДКОСТІ ВІТРУ ПО ПЕРВИННИМ ДАНИМ ПОЛЬОТУ РАДІОЗОНДА ГМ ЧАМ

Таблиця 3.1 Вид первинних даних Одеського Гідрометцентру радіозонда радіотеодоліт-УЛ

№ пп	Час	T	U	P	H	D	d
1	0,00	-5,6	77	1020,9	0,042	0,201	315
2	0,50	-7,5	82	999,1	0,211	0,222	325
3	1,00	-8,5	82	977,5	0,381	0,471	360
4	1,50	-9,7	81	956,4	0,550	0,647	359
5	2,00	-11,1	83	935,5	0,720	0,970	358
6	2,50	-12,5	87	915,1	0,889	1,197	16
7	3,00	-13,8	88	898,9	1,025	1,392	6
8	3,50	-14,8	91	881,8	1,171	1,603	1
9	4,00	-15,9	93	863,5	1,329	1,842	6
10	4,50	-16,0	83	847,2	1,473	2,084	355
11	5,00	-16,8	74	830,5	1,623	2,257	348
12	5,50	-17,4	64	813,1	1,782	2,418	339
13	6,00	-18,4	58	794,6	1,954	2,564	321
14	6,50	-19,1	55	776,7	2,124	2,713	303
15	7,00	-19,5	51	760,5	2,281	2,871	307
16	7,50	-20,7	50	743,0	2,454	3,017	311
17	8,00	-20,9	51	725,7	2,628	3,238	328
18	8,50	-21,9	50	707,7	2,813	3,476	348
19	9,00	-22,2	47	691,9	2,979	3,721	348
20	9,50	-23,4	47	676,3	3,146	4,030	344

%Обчислення траєкторії польоту кулі-пілота та просторова візуалізація польоту кулі-пілота.

%построение троектории полета радиозонда

close all; %Удаление графических окон и очистка рабочей области

clear, clc,


```

%pack
% чтение txt файла
% файл txt не должен содержать запятые а только точка и не должен
содержать
% буквы
%BL=load('Первич данные_23.08.2013.txt');
%BL=load('Первич данные_1.txt');
%BL=load('E:\АСМОС\2017-2018\Гідрометеорологічні
вимірювальні системи\МЗЗА_студентам\Курсовой\Первич данные_1.txt');
%BL=load('C:\Documents and Settings\Сергей\Мои документы\
MATLAB\Радио_Зонд\Лаб_МЗГМВ\Первич данные_1.txt');
BL=load('Первич данные_23.08.2013.txt');
beta=BL(:,3)*(0.06*pi/180); % Угол места, вертикальний угол, рад
beta_g=BL(:,3)*0.06; % Угол места, вертикальний угол, грд
alfa=BL(:,2)*(0.06*pi/180); % Азимут, горизонтальный угол, рад
alfa_g=BL(:,2)*0.06; % Азимут, горизонтальный угол, грд
ho=43; % высота над уровнем моря г. Одесса
disp(['Первичные данные =' mat2str(BL(5,:))]); %Отображение 5-й
строки первичных данных
%===== Определение высоты, BL(:,4) - дальность
H=(BL(:,4).*sin(beta))+ho;
Rz=6370000; % радиус Земли, метр
Dh=BL(:,4); %дальность
% Определений высоты с учетом кривизны Земли
H_z=(Dh.*sin(beta))+ho+(Dh.^2)/(2*Rz);
H=[ho;H];
figure, plot(BL(:,1),H(2:end)/1000), grid on,set(gca,'FontName','Arial
Cyr','FontSize',10)
title('вертикально-временной профиль подъема радиозонда') ,
xlabel('время мин') ,ylabel('высота км '),

```

```

V=(H(4:end)- H(2:end-2))/1;    % вертикальной скорости подъема,
разность высот за время 1-минута=вертикальная скорость метр/минут
V_men=smooth(V,11); % Скользящее усреднение с окном размера 11-
пикселей соответствует 10 минутам метр/минута
V_men1=[V(1); V(1);smooth(V,11); V(end)];
Vs= V_men1/60; % вертикальной скорости подъема,м/сек
figure,          plot(H(1:end-2),V_men1(1:end-2)),          grid          on,
set(gca,'FontName','Arial Cyr','FontSize',10),
title('вертикальной скорости подъема радиозонда') , xlabel('высота
метр') ,ylabel('скорости метр/минут '),

beta=BL(:,3)*(0.06*pi/180); % Угол места, вертикальный угол, рад
beta_g=BL(:,3)*0.06; % % Угол места, вертикальный угол, грд
alfa=BL(:,2)*(0.06*pi/180); % Азимут, горизонтальный угол, рад
alfa_g=BL(:,2)*0.06; % % Азимут, горизонтальный угол, грд
r=BL(:,4); %дальность в метрах
%горизонтальная дальность, проекция дальности r на
горизонтальную плоскость
L=r.*cos(beta);% горизонтальная дальность, метры
L1=[0;L];
%меридианная составляющая-у горизонтальной дальности
Ly=L.*cos(alfa); Ly=[0;Ly];
% зональная(широтная)-х составляющая горизонтальной дальности
Lx=L.*sin(alfa); Lx=[0;Lx];

% Визуализация полета радиозонда построенная по параметрически
заданным
% составляющих x,y.
% горизонтальная проекция полета радиозонда

```

```
figure, plot(Lx,Ly),grid on, set(gca,'FontName','Arial Cyr','FontSize',10),
title('горизонтальная проекция полета радиозонда')
xlabel('запад-восток, метр') ,ylabel('юг-север, метр ').
```

(Вертикальна швидкість підйому радіозонда обчислюється з точністю 1м / хв в шарах за 10-хвилинні інтервали часу шляхом ділення різниці висот в метрах на різницю часу в хвилинах) (рис3.1).



Рисунок 3.1 – Горизонтальна проекція польоту радіозонду

%Создание массива моментов наблюдений (времени), по которым производится обработка.

```
Tt= BL(:,1); %моменты наблюдения времени в минутах
```

```
Tt=[0;Tt];
```

```
for k=2:length(Lx);
```

```
    Vx(k)=(Lx(k)-Lx(k-1))/(Tt(k)-Tt(k-1)); %зональная составляющая
    горизонтальной %скорости м/мин
```

```
    Uy(k)=(Ly(k)-Ly(k-1))/(Tt(k)-Tt(k-1)); %меридианная составляющая
    горизонтальной %скорости м/мин
```

```
    VL(k)=abs((L1(k)-L1(k-1))/(Tt(k)-Tt(k-1)));
```

```

end

W=sqrt(Vx.^2+ Uy.^2);%результующая горизонтальная скорость
ветра в вертикальном слое высоты,м/мин

%H=[ho;H];

Ws=W/60; % результующая горизонтальная скорость ветра в
вертикальном слое высоты,м/сек

Wz=W*60/1000; % результующая горизонтальная скорость ветра в
вертикальном слое высоты,км/час

figure, plot(Ws(1:end-2),H(1:end-2)/1000), grid
on,set(gca,'FontName','Arial Cyr','FontSize',10),

title('горизонтальная скорости ветра в слое высоты') , xlabel('скорость м/
сек') ,ylabel('высота км') (рис 3.2).

```

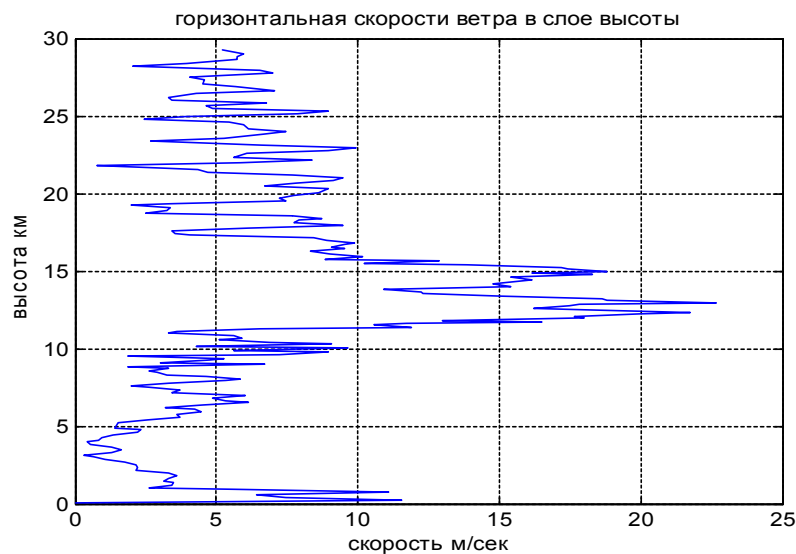


Рисунок 3.2 – Горизонтальна швидкості вітру у слої висоти

```

figure, plot(Ws(1:end-2),H(1:end-2)/1000),hold on,
plot(VL(1:end-2)/60,H(1:end-2)/1000,'r'),
grid on,set(gca,'FontName','Arial Cyr','FontSize',10),
title('горизонтальная скорости ветра в слое высоты') , xlabel('скорость м/
сек') ,ylabel('высота км'),

```

```

    %Угол направления полета радиозонда в горизонтальной плоскости
от -pi до pi
    Dw(1)=0;
    for k=2:length(Vx);
        Dw(k)= atan(Vx(k)/Uy(k)); % Угол направления радиозонда, радиан
    end
    %Определения направления горизонтального движения радиозонда,
угол,
    %куда дует ветер, относительно меридианной составляющей
(направления на север) в радианах.
    for k=1:length(Lx);
        if (Vx(k)>=0)&&(Uy(k)>=0);
            DW(k)=abs(Dw(k));
        elseif (Vx(k)<0)&&(Uy(k)<0);
            DW(k)=abs(Dw(k))+pi;
        elseif (Vx(k)<0)&&(Uy(k)>0);
            DW(k)=-abs(Dw(k))+2*pi;
        elseif (Vx(k)>0)&&(Uy(k)<0);
            DW(k)=-abs(Dw(k))+pi;
        end
    end
    end

    %Направления горизонтального движения радиозонда в градусах.
    DW_grd=DW*360/(2*pi);

    %Вертикальные профили горизонтальной (а и б) компонент скорости
ветра и вертикальной скорости подъема радиозонда.
    figure, subplot (1,3, 1)
        plot(Ws(1:end-2),H(1:end-2)/1000),grid on,title('вертикальная профиль
скорости') ,
        xlabel('Скорость ветра, метр/секун') ,ylabel('высота, км '),

```

```

subplot (1,3, 2)
    plot(DW_grd(1:end-2),H(1:end-2)/1000),grid on,title('вертикальная
профиль направления') ,
    xlabel('Направление ветра, градус') ,ylabel('высота, км '),
subplot (1,3, 3)
    plot(Vs(1:end-2),H(1:end-2)/1000),grid on,title('вертикальная профиль ') ,
    xlabel('Скорость подема, метр/секун') ,ylabel('высота, км '),
    %Производим усреднение зональной и меридеанной составляющая
горизонтальной скорости ветра в окне размера 11-значений слоя высоты, что
соответствует толщине слоя 1.5 км.
    Vx_men=smooth(Vx,11);
    Uy_men=smooth(Uy,11);
    % Скользящее усреднение с окном размера 11-пикселей
соответствует 1500 метр толщины слоя высоты
    W_men=sqrt(Vx_men.^2+ Uy_men.^2);%результатирующая
горизонтальная скорость ветра в вертикальном слое высоты,м/мин
    %
    Ws_men=W_men/60; % результирующая горизонтальная скорость
ветра в вертикальном слое высоты,м/сек
    Wz_men=W_men*60/1000; % результирующая горизонтальная
скорость ветра в вертикальном слое высоты,км/час
    %Угол направления полета радиозонда в горизонтальной плоскости
от -pi до +pi для усредненных зональной и меридеанной составляющая
горизонтальной скорости.
    Dw_men(1)=0;
    for k=2:length(Vx_men);
        Dw_men(k)= atan(Vx_men(k)/Uy_men(k)); % Угол направления
радиозонда, радиан
    end

```

```

%Определения направления горизонтального движения радиозонда,
угол,
%куда дует ветер, относительно меридианной составляющей
(направления на север) в радианах.
for k=1:length(Lx);
    if (Vx_men(k)>=0)&&(Uy_men(k)>=0);
        DW_men(k)=abs(Dw_men(k));
    elseif (Vx_men(k)<0)&&(Uy_men(k)<0);
        DW_men(k)=abs(Dw_men(k))+pi;
    elseif (Vx_men(k)<0)&&(Uy_men(k)>0);
        DW_men(k)=-abs(Dw_men(k))+2*pi;
    elseif (Vx_men(k)>0)&&(Uy_men(k)<0);
        DW_men(k)=-abs(Dw_men(k))+pi;
    end
end

%Направления горизонтального движения радиозонда в градусах.
DWm_grd=DW_men*360/(2*pi);
figure, subplot (1,3, 1)
    plot(Ws_men(1:end-2),H(1:end-2)/1000),grid on,title('вертикальная
профиль скорости') ,
    xlabel('Скорость ветра, метр/секун') ,ylabel('высота, км '),
    subplot (1,3, 2)
        plot(DWm_grd(1:end-2),H(1:end-2)/1000),grid on,title('вертикальная
профиль направления') ,
        xlabel('Направление ветра, градус') ,ylabel('высота, км '),
        subplot (1,3, 3)
            plot(Vs(1:end-2),H(1:end-2)/1000),grid on,title('вертикальная профиль
скорость подема') ,
            xlabel('Скорость подема, метр/секун') ,ylabel('высота, км ') (рис 3.3).

```

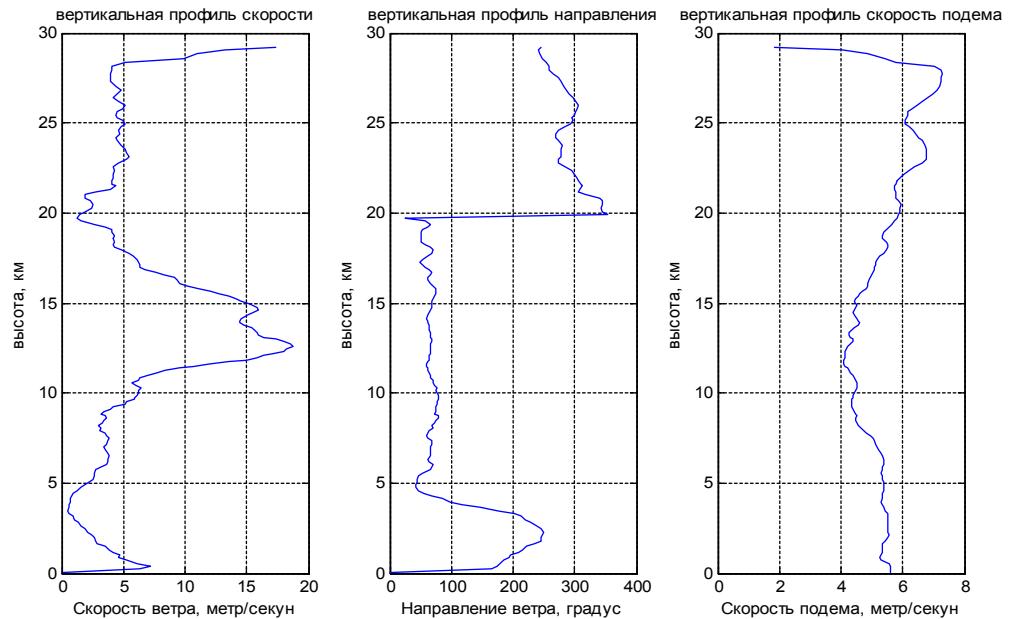


Рисунок 3.3 – Вертикальный профиль усредненной горизонтальной скорости, напрямку вітру і вертикальної швидкості підйому радіозонду

На рисунку вище наведено приклад вимірювання вертикальних профілів вітру. Результат вимірювання являє собою три графіка: горизонтальна швидкість вітру, її напрямок і вертикальна швидкість вітру.

% Визуализация полета радиозонда, проекция на горизонтальную поверхность

figure, plot(Lx,Ly, 'LineWidth', 2),grid on,title('горизонтальная проекция полета радиозонда и направление ветра')

xlabel('запад-восток, метр') ,ylabel('юг-север, метр '),

for k=2:4:100;

hold on

quiver(Lx(k),Ly(k), Vx(k),Uy(k),0,'ro');

hold on

quiver(Lx(k),Ly(k), Vx(k),Uy(k),0,'k');

end

%Производим усреднение зональной и меридеанной составляющая горизонтальной

%дальности


```

Lx_men=smooth(Lx,11); Ly_men=smooth(Ly,11);
figure, plot(Lx_men,Ly_men, 'LineWidth', 2),grid on,title('горизонтальная
проекция полета радиозонда и вектора направление ветра')
xlabel('запад-восток, метр') ,ylabel('юг-север, метр '),
for k=2:4:length(Lx_men);
hold on
quiver(Lx_men(k),Ly_men(k), Vx_men(k),Uy_men(k),0,'ro');
hold on
quiver(Lx_men(k),Ly_men(k), Vx_men(k),Uy_men(k),0,'k');
end
% Построение угловой диаграммы (в полярных координатах,
подчитывает
% количество угловых элементов в каждом интервале под названием -
роза ветров
figure, rose(DW_men,20), title('роза ветров направления ветра
горизонтальная проекция полета радиозонда')
xlabel('Восток') ,ylabel('Юг ') (рис 3.4).

```

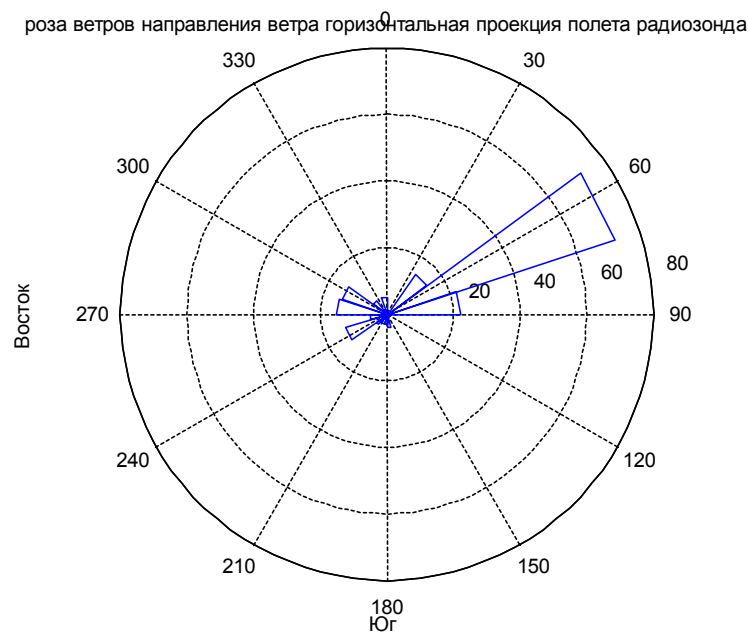


Рисунок 3.4 – Кругова гістограма розподілення напрямку вітру

```

% Построение угловой диаграммы (в полярных координатах,
подчитывает
% количество угловых элеменов в каждом интервале под названием -
роза ветров. Гистограмма в полярных координатах.
%Команды rose(phi, n) подсчитывают и отображают на графике
количество угловых элементов в массиве phi,
%значения которых попадают в заданный интервал; для этого весь
диапазон значений phi делится на n интервалов
%(по умолчанию 20) и подсчитывается количество угловых элементов
в каждом интервале.
%view(az, el ) или view ( [az, el] ) — задание Положения ТОЧКИ обзора
%при помощи азимута(az) и угла склонения(возвышения (el)),
выраженных в градусах
%YDir - направление координатных осей. Значения 'reverse' - в
обратном направлении.
% задаем сектора в которых подсчитывается количество угловых
элементов для
% построения гистогаммы в полярных координатах. Центры секторов
соответствуют румбам
rumb=[0, 22.5, 45, 67.5, 90, 112.5, 135, 157.5, 180, 202.5, 225, 247.5, 270,
292.5, 314, 337.5]*pi/180;
figure, rose(DW_men,rumb),set(gca,'View',[-90 90],'YDir','reverse'),
title('роза ветров направления ветра, Гистограмма в полярных координатах')
xlabel('Запод') ,ylabel('Юг '),
figure, subplot (1,2, 1)
plot(DWm_grd(1:end-2),H(1:end-2)/1000),grid on,title('вертикальная
профиль направления') ,
xlabel('Направление ветра, градус') ,ylabel('высота, км '),
subplot (1,2, 2)

```

`rose(DW_men, rumb), set(gca, 'View', [-90 90], 'YDir', 'reverse'), title('роза ветров'), xlabel('Запад') , ylabel('Юг ') (рис. 3.5).`

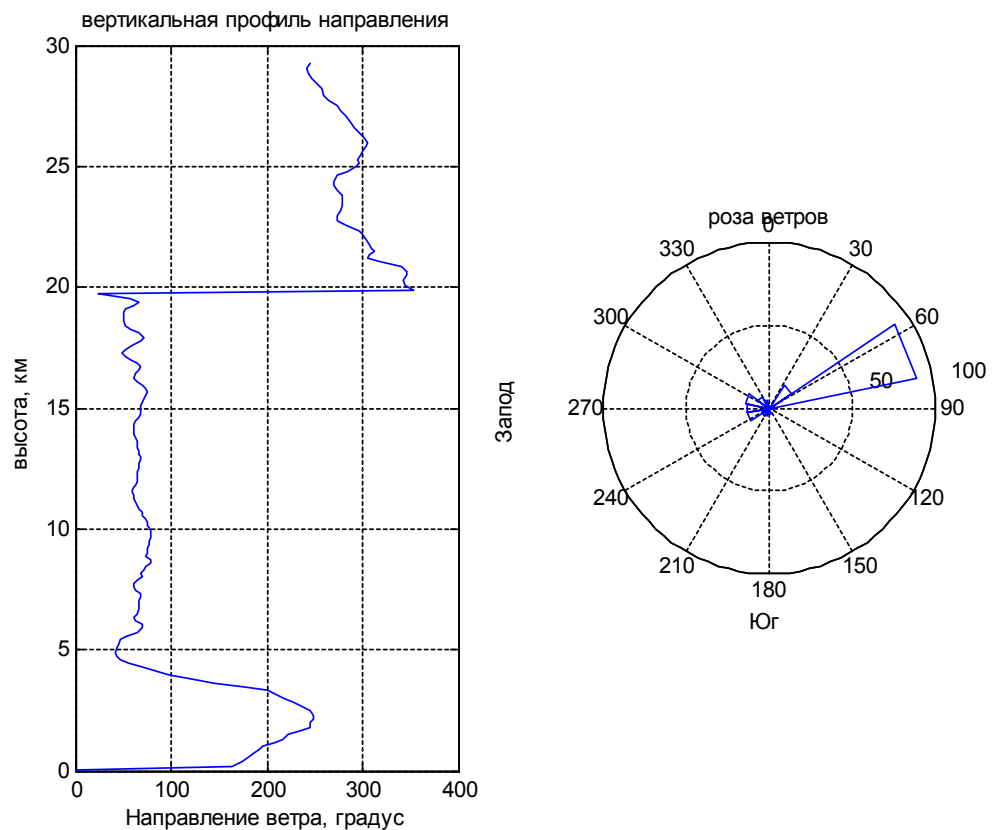


Рисунок 3.5 – Спільний графік вертикального профілю напрямлення горизонтальної складової вітру і кутової гістограми

`%Построение и визуализация пространственной траектории полета радиозонда и`

`%горизонтальная проекция полета радиозонда`

`H_1=ones(size(H));H_0=zeros(size(H));`

`figure,`

`plot3(Lx_men/1000, Ly_men/1000, H/1000, Lx_men/1000, Ly_men/1000, H_1/1000, '-r'), grid on, title('Пространственная траектория полёта радиозонда') ,`

`%colorbar`

`%colormap(hot)`

`xlabel('запад-восток, км'), ylabel('юг-север, км'), zlabel('высота, км') (рис. 3.6).`

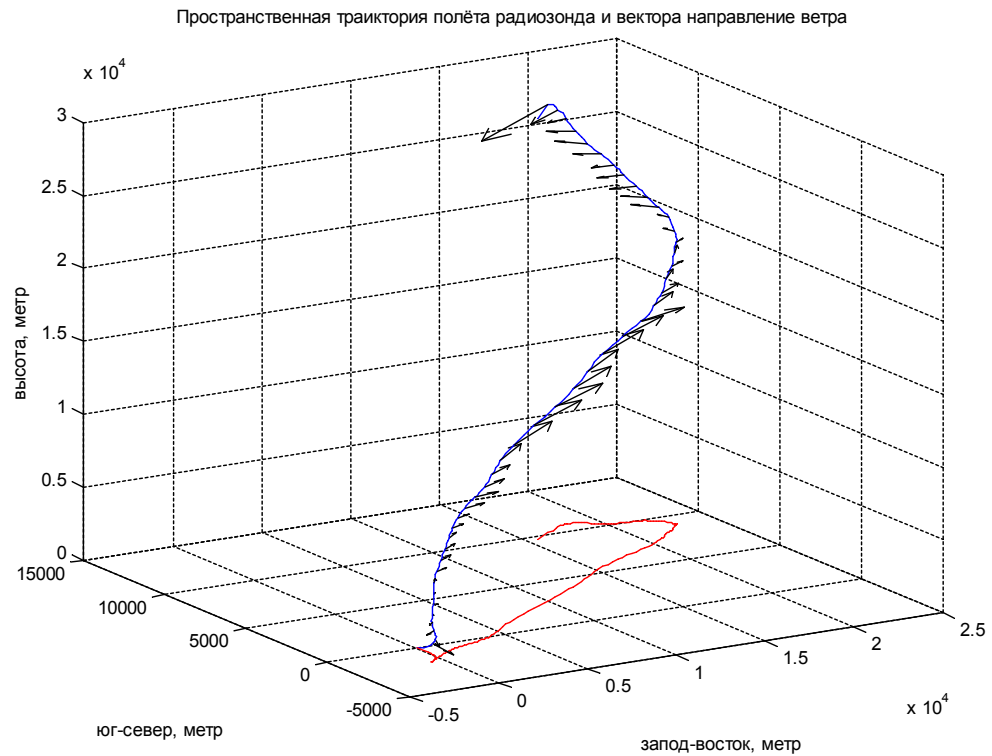


Рисунок 3.6 – Просторова траекторія польоту радіозонда і вектора напрямку вітру

```

Lx_men1=Lx_men(1:4:length(Lx_men));
Ly_men1=Ly_men(1:4:length(Lx_men));
H1=H(1:4:length(Lx_men));
H01=H_0(1:4:length(Lx_men));
Vx_men1=Vx_men(1:4:length(Lx_men));
Uy_men1=Uy_men(1:4:length(Lx_men));
figure,          plot3(Lx_men,Ly_men,H,Lx_men,Ly_men,H_1,'-r'),grid
on,title('Пространственная траектория полёта радиозонда и вектора
направление ветра') ,
    xlabel('запад-восток, метр') ,ylabel('юг-север, метр '),zlabel('высота,
метр '),
    hold on, quiver3(Lx_men1,Ly_men1,H1, Vx_men1,Uy_men1,H01,1.2,'k');
    %Производим усреднение зональной и меридеанной составляющая
горизонтальной

```

```

%дальности
figure, plot(Lx_men,Ly_men, 'LineWidth', 1),grid on,title('горизонтальная
проекция полета радиозонда и вектора направление ветра')
xlabel('запад-восток, метр') ,ylabel('юг-север, метр '),
hold on, plot(Lx_men1,Ly_men1,'ro');
hold on, quiver(Lx_men1,Ly_men1, Vx_men1,Uy_men1,0.5,'k');
% =====Построение троектории полета в заданном слое
высоте=====
dh=300; h1=1500; % метры
f1=find(H<h1-dh); %Определение индексов при которых значение
меньше
f2=find(H<h1+dh); %Определение индексов при которых значение
меньше
% %Построение и визуализация пространственной троектории полета
радиозонда
% в слое от h1 до h2
%Производим усреднение зональной и меридеанной составляющая
горизонтальной
%для определения среднего направления ветра в слое [f1(end):f2(end)]
Vx_reg=smooth(Vx(f1(end):f2(end))),(f2(end)-f1(end)));
Uy_reg=smooth(Uy(f1(end):f2(end))),(f2(end)-f1(end)));
Vx_reg1=Vx_reg(round((f2(end)-f1(end))/2));
Uy_reg1=Uy_reg(round((f2(end)-f1(end))/2));
Dw_reg= atan(Vx_reg1/Uy_reg1); % Угол направления радиозонда, в
горизонтальной плоскости от -pi до pi радиан
%среднего направления ветра в слое [f1(end):f2(end)]
if (Vx_reg1>=0)&&(Uy_reg1>=0);
    DW_reg=abs(Dw_reg);
elseif (Vx_reg1<0)&&(Uy_reg1<0);
    DW_reg=abs(Dw_reg)+pi;

```

```

elseif (Vx_reg1<0)&&(Uy_reg1>0);
    DW_reg=-abs(Dw_reg)+2*pi;
elseif (Vx_reg1>0)&&(Uy_reg1<0);
    DW_reg=-abs(Dw_reg)+pi;
end
DW_reg_grd=DW_reg*360/(2*pi);
%figure, compass(Vx_reg1/60,Uy_reg1/60),
%figure, polar([0 DW_reg],[0 10]),
% Построение угловой диаграммы (в полярных координатах,
подчитывает
% количество угловых элементов в каждом интервале под названием -
роза ветров
figure, rose(DW(f1(end):f2(end)),rumb),set(gca,'View',[-90
90],'YDir','reverse'),
title(['роза ветров в слое [' mat2str(round(H(f1(end)))) '
mat2str(round(H(f2(end)))) '] метр и направление среднего ветра'])
xlabel('Восток') ,ylabel('ЮГ '),
hold on, compass(Uy_reg1/120,Vx_reg1/120,'r'),
disp(['Расчетные данные средней скорости и направления ветра в слое ['
mat2str(round(H(f1(end)))) ' ' mat2str(round(H(f2(end)))) '] метр W='
mat2str(round((sqrt(Vx_reg1.^2+ Uy_reg1.^2))*100/60)/100) ' м/сек, DW='
mat2str(round( DW_reg_grd)) ' град ']);
%% Слой высоты от 100 мет до 2000 мет
h_1=300; h2=3000; % метры
f1=find(H<h2-dh); %Определение индексов при которых значение
меньше
f2=find(H<h2+dh); %Определение индексов при которых значение
меньше
% %Построение и визуализация пространственной траектории полета
радиозонда

```

```

% в слое от h1 до h2

%Производим усреднение зональной и меридеанной составляющая
горизонтальной

%для определения среднего направления ветра в слое [f1(end):f2(end)]
Vx_reg=smooth(Vx(f1(end):f2(end))),(f2(end)-f1(end));
Uy_reg=smooth(Uy(f1(end):f2(end))),(f2(end)-f1(end));
Vx_reg1=Vx_reg(round((f2(end)-f1(end))/2));
Uy_reg1=Uy_reg(round((f2(end)-f1(end))/2));
Dw_reg= atan(Vx_reg1/Uy_reg1); % Угол направления радиозонда, в
горизонтальной плоскости от -pi до pi радиан

%среднего направления ветра в слое [f1(end):f2(end)]
DW_reg1=[];
if (Vx_reg1>=0)&&(Uy_reg1>=0);
    DW_reg1=abs(Dw_reg);
elseif (Vx_reg1<0)&&(Uy_reg1<0);
    DW_reg1=abs(Dw_reg)+pi;
elseif (Vx_reg1<0)&&(Uy_reg1>0);
    DW_reg1=-abs(Dw_reg)+2*pi;
elseif (Vx_reg1>0)&&(Uy_reg1<0);
    DW_reg1=-abs(Dw_reg)+pi;
end
DW_reg_grd1=DW_reg1*360/(2*pi);
%figure, compass(Vx_reg1/60,Uy_reg1/60),
%figure, polar([0 DW_reg],[0 10]),
figure, rose(DW(f1(end):f2(end)),rumb),set(gca,'View',[-90
90],'YDir','reverse'),
title(['поза ветров в слое [' mat2str(round(H(f1(end)))) '
mat2str(round(H(f2(end)))) ']метр и направление среднего ветра'])
xlabel('Восток') ,ylabel('Юг '),
hold on, compass(Uy_reg1/40,Vx_reg1/40,'r'),

```

```

disp(['Расчетные данные средней скорости и направления ветра в слое ['
mat2str(round(H(f1(end)))) ' ' mat2str(round(H(f2(end)))) ']метр W='
mat2str(round((sqrt(Vx_reg1.^2+ Uy_reg1.^2))*100/60)/100) 'м/сек, DW='
mat2str(round( DW_reg_grd1)) ' грд ']);

%% Слой высоты 0т 2100 мет до 4000 мет
h3=6000; % метры
f3=find(H<h3-dh); %Определение индексов при которых значение
меньше
f4=find(H<h3+dh); %Определение индексов при которых значение
меньше
% %Построение и визуализация пространственной троектории полета
радиозонда
% в слое от h1 до h2
%Производим усреднение зональной и меридеанной составляющая
горизонтальной
%для определения среднего направления ветра в слое [f1(end):f2(end)]
Vx_reg=smooth(Vx(f3(end):f4(end)),(f4(end)-f3(end)));
Uy_reg=smooth(Uy(f3(end):f4(end)),(f4(end)-f3(end)));
Vx_reg2=Vx_reg(round((f4(end)-f3(end))/2));
Uy_reg2=Uy_reg(round((f4(end)-f3(end))/2));
Dw_reg= atan(Vx_reg2/Uy_reg2); % Угол направления радиозонда, в
горизонтальной плоскости от -pi до pi радиан
%среднего направления ветра в слое [f1(end):f2(end)]
DW_reg2=[];
if (Vx_reg2>=0)&&(Uy_reg2>=0);
DW_reg2=abs(Dw_reg);
elseif (Vx_reg2<0)&&(Uy_reg2<0);
DW_reg2=abs(Dw_reg)+pi;
elseif (Vx_reg2<0)&&(Uy_reg2>0);

```



```

        DW_reg2=-abs(Dw_reg)+2*pi;
    elseif (Vx_reg2>0)&&(Uy_reg2<0);
        DW_reg2=-abs(Dw_reg)+pi;
    end
    DW_reg_grd2=DW_reg2*360/(2*pi);
    figure,          rose(DW(f3(end):f4(end)),rumb),set(gca,'View',[-90
90],'YDir','reverse'),
    title(['поза ветров в слое [' mat2str(round(H(f3(end)))) ' '
mat2str(round(H(f4(end)))) ']метр и направление среднего ветра'])
    xlabel('Восток') ,ylabel('ЮГ '),
    hold on, compass(Uy_reg2/120,Vx_reg2/120,'r'),
    disp(['Расчетные данные средней скорости и направления ветра в слое ['
mat2str(round(H(f3(end)))) ' ' mat2str(round(H(f4(end)))) ']метр W='
mat2str(round((sqrt(Vx_reg2.^2+ Uy_reg2.^2))*100/60)/100) 'м/сек, DW='
mat2str(round( DW_reg_grd2)) ' град ']);
    % =====Построение троектории полета в заданном слое
    ВЫСОТЕ=====
    dh=300; h1=9000; % метры
    f1=find(H<h1-dh); %Определение индексов при которых значение
    меньше
    f2=find(H<h1+dh); %Определение индексов при которых значение
    меньше
    % %Построение и визуализация пространственной троектории полета
    радиозонда
    % в слое от h1-dh до h1+dh
    %Производим усреднение зональной и меридеанной составляющая
    горизонтальной
    %для определения среднего направления ветра в слое [f1(end):f2(end)]
    Vx_reg=smooth(Vx(f1(end):f2(end)),(f2(end)-f1(end)));
    Uy_reg=smooth(Uy(f1(end):f2(end)),(f2(end)-f1(end)));

```

```

Vx_reg1=Vx_reg(round((f2(end)-f1(end))/2));
Uy_reg1=Uy_reg(round((f2(end)-f1(end))/2));
Dw_reg= atan(Vx_reg1/Uy_reg1); % Угол направления радиозонда, в
горизонтальной плоскости от -pi до pi радиан
%среднего направления ветра в слое [f1(end):f2(end)]
if (Vx_reg1>=0)&&(Uy_reg1>=0);
    DW_reg=abs(Dw_reg);
elseif (Vx_reg1<0)&&(Uy_reg1<0);
    DW_reg=abs(Dw_reg)+pi;
elseif (Vx_reg1<0)&&(Uy_reg1>0);
    DW_reg=-abs(Dw_reg)+2*pi;
elseif (Vx_reg1>0)&&(Uy_reg1<0);
    DW_reg=-abs(Dw_reg)+pi;
end
DW_reg_grd=DW_reg*360/(2*pi);
% Построение угловой диаграммы (в полярных координатах,
подчитывает
% количество угловых элементов в каждом интервале под названием -
роза ветров
figure, rose(DW(f1(end):f2(end)),rumb),set(gca,'View',[-90
90],'YDir','reverse'),
title(['роза ветров в слое [' mat2str(round(H(f1(end)))) ' '
mat2str(round(H(f2(end)))) '] метр и направление среднего ветра'])
xlabel('Восток') ,ylabel('Юг '),
hold on, compass(Uy_reg1/150,Vx_reg1/150,'r'),
disp(['Расчетные данные средней скорости и направления ветра в слое ['
mat2str(round(H(f1(end)))) ' ' mat2str(round(H(f2(end)))) '] метр W='
mat2str(round((sqrt(Vx_reg1.^2+ Uy_reg1.^2))*100/60)/100) ' м/сек, DW='
mat2str(round( DW_reg_grd)) ' грд ']);
%=====

```

```

% Визуализация полета радиозонда построенная по параметрическим
заданных
% линий и поверхностей
% Формирование выторов для отображения вертикальной и
горизонтальной
% проекции полета радиозонда
H_1=ones(size(H));%D
figure,
plot3(Lx,Ly,H/1000,'-b',Lx,Ly,H_1,'-r',Lx(end),Ly(end),H(end)/1000,'or'),grid
on,title('Пространственная траектория полёта радиозонда') ,
xlabel('запад-восток, метр') ,ylabel('юг-север, метр '),zlabel('высота, км
'),
pay1=get(gca, 'YLim'); %Пределы изменения переменной оси Y.
pax1=get(gca, 'XLim'); %Пределы изменения переменной оси X.
paz1=get(gca, 'ZLim'); %Пределы изменения переменной оси Z.

%Формирование файла, имитационная модель пространственного
полета радиозонда
Lx2=[]; Ly2=[]; H2=[];H_2=[];
Lx2(1)=Lx(1); Ly2(1)=Ly(1); H2(1)=H(1);H_2(1)=H_1(1);
mH=min(H); MH=max(H);
F(length(H))=struct('cdata',[],'colormap',[]);%Предварительно создать
пустой массив структур размера возвращаемой getframe
figure,
for t=2:length(H);
%Dgx1(1)=Dgx(1); Dgy1(1)=Dgy(1); H2(1)=H1(1);H_2(1)=H_1(1);
Dgx3=Lx(t); Dgy3=Ly(t);H3=H(t);
Lx2=[Lx2(1:(t-1));Lx(t)];
Ly2=[Ly2(1:(t-1));Ly(t)];
H2=[H2(1:(t-1));H(t)];

```

```

H_2=[H_2(1:(t-1));H_1(t)];
plot3(Lx2, Ly2, H2, 'r', Dgx3, Dgy3, H3, 'or', Lx2, Ly2, H_2, 'b');
%plot3(Dgx2, Dgy2, H2, 'r', Dgx2, Dgy2, H_2, 'b');
grid on, title('Пространственная траектория полёта радиозонда') ,
    xlabel('запад-восток, метр') , ylabel('юг-север, метр '), zlabel('высота,
кметр '),
    axis([pax1(1) pax1(2) pay1(1) pay1(2) 0 MH+100])
F(t)=getframe(gcf);
end
%F(1)=getframe(gcf);

F(1)=F(2);

% вывод изображения кадра из последовательности кадров массива
структур
%figure, imshow(F(1).cdata)
%Создадим файл 25 кадров/секунда, 75%-качество сжатия 75%
movie2avi(F, 'polet1', 'fps', 5, 'quality', 75) (рис. 3.7)

```

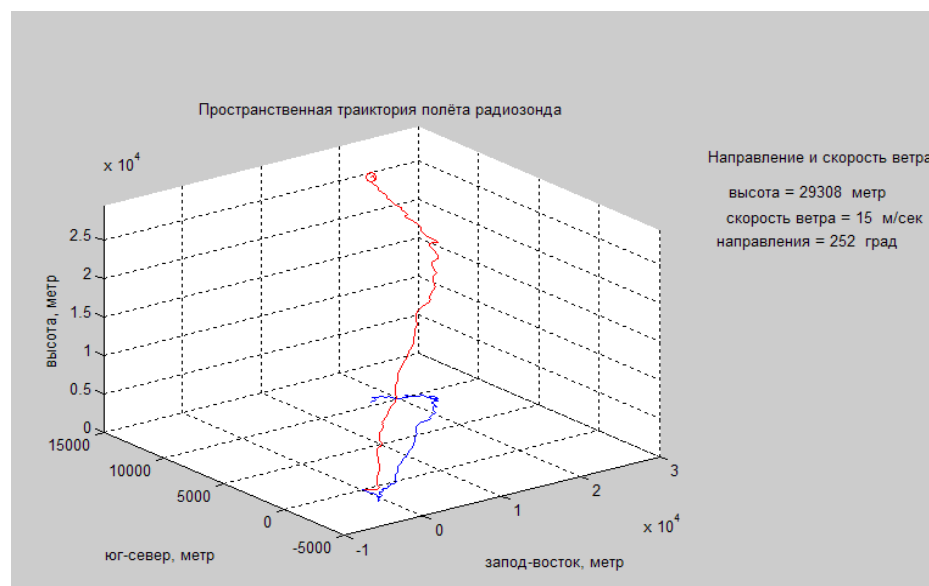


Рисунок 3.7 – Останній кадр анімаційного моделювання польоту радіозонду с параметрами вітру на висоті

```

get(gcf,'Position'), %296 342 560 420
get(axes,'Position'),
close all

F1(length(H))=struct('cdata',[],'colormap',[]);%Предварительно создать
пустой массив структур размера возвращаемой getframe
Lx2=[]; Ly2=[]; H2=[];H_2=[];H3=[];
Lx2(1)=Lx(1); Ly2(1)=Ly(1); H2(1)=H(1);H_2(1)=H_1(1);
mH=min(H); MH=max(H);
%figure,
for t=2:length(H);
    %Dgx1(1)=Dgx(1); Dgy1(1)=Dgy(1); H2(1)=H1(1);H_2(1)=H_1(1);
    Dgx3=Lx(t); Dgy3=Ly(t);H3=H(t);
    Lx2=[Lx2(1:(t-1));Lx(t)];
    Ly2=[Ly2(1:(t-1));Ly(t)];
    H2=[H2(1:(t-1));H(t)];
    H_2=[H_2(1:(t-1));H_1(t)];
    set(gcf,'Position',[69 203 760 500]),%изменить положение и
размер текущего окна в пикселях
    set(axes,'Position',[0.1 0.1 0.6 0.7],'Box','on'),%изменить
положение и размер осей текущего окна, нормализованные единицы

    plot3(Lx2,Ly2,H2,'r',Dgx3,Dgy3,H3,'or',Lx2,Ly2,H_2,'b');
    axis([pax1(1) pax1(2) pay1(1) pay1(2) 0 MH+100])
    grid on,title('Пространственная траектория полёта радиозонда') ,
    xlabel('запод-восток, метр') ,ylabel('юг-север, метр '),zlabel('высота,
метр '),
    % axis([pax1(1) pax1(2) pay1(1) pay1(2) 0 MH+100])
    text(90000, 30000,'Направление и скорость ветра на высоте')
    text(85000, 25000,['высота = ', num2str(round(H(t))), ' метр'] ) ,

```

```

text(80000, 22000,['скорость ветра = ', num2str(round(Ws(t))), ' м/сек'])
,
text(75000, 19500,['направления = ', num2str(round(DW_grd(t))), '
град']) ,
F1(t)=getframe(gcf);
close
end
F1(1)=F1(2);
%Создадим файл 5 кадров/секунда,75%-качество сжатия 75%
movie2avi(F1,'polet2','fps',5,'quality',75);
%clear F1,
%-----
%Выводим 1 раз видеопоследовательность на экран
%с частотой 2 кадров в секунду.
% проигрываем видео
hf = figure('MenuBar','none'); %Приводит к скрытию меню
set(gcf,'Position',[69 203 760 500]),%изменить положение и размер
текущего окна в пикселях
movie(hf, F1, 1, 2);
%=====
% Выделение кадр изображения из массива структур
Im2=F1(2).cdata;
figure,imshow(Im2),
figure, imshow(F1(end-1).cdata)
text(606, 50,['высота = ', num2str(round(H2(end-1))), ' метр'] ) ,
text(606, 80,['скорость ветра = ', num2str(round(Ws(end-1))), ' мет/сек']) ,
%%=====
%Построение и визуализация пространственной троектории полета
радиозонда и
%горизонтальная проекция полета радиозонда

```

```

H_1=ones(size(H));H_0=zeros(size(H));
figure,
%plot3(Lx,Ly,H,Lx,Ly,H_1,'-r'),grid on,title('Пространственная
траектория полёта радиозонда') ,
set(gcf,'Position',[69 203 760 500]),%изменить положение и размер
текущего окна в пикселях
set(axes,'Position',[0.1 0.1 0.5 0.7],'Box','on'),%изменить положение и
размер осей текущего окна, нормализованные единицы
%set(gcf,'Position',[69 203 760 500]),
plot3(Lx,Ly,H,Lx,Ly,H_1,'-r'),grid on,title('Пространственная
траектория полёта радиозонда') ,
% plot(Lx,Ly, 'LineWidth', 2),grid on
% rose(DW(f1(end):f2(end)),rumb),set(gca,'View',[-90
90],'YDir','reverse'),
%hold on, compass(Uy_reg1/150,Vx_reg1/150,'r'),
xlabel('запад-восток, км') ,ylabel('юг-север, км'),zlabel('высота, км'),
text(90000, 30000,'Направление и скорость ветра на высоте')
text(90000, 25000,['высота = ', num2str(round(1000)), ' метр'] ) ,
text(85000, 22000,['скорость ветра = ', num2str(round(5)), ' мет/сек']) ,
text(80000, 19500,['направления = ', num2str(240), ' град']) (рис. 3.8).

```

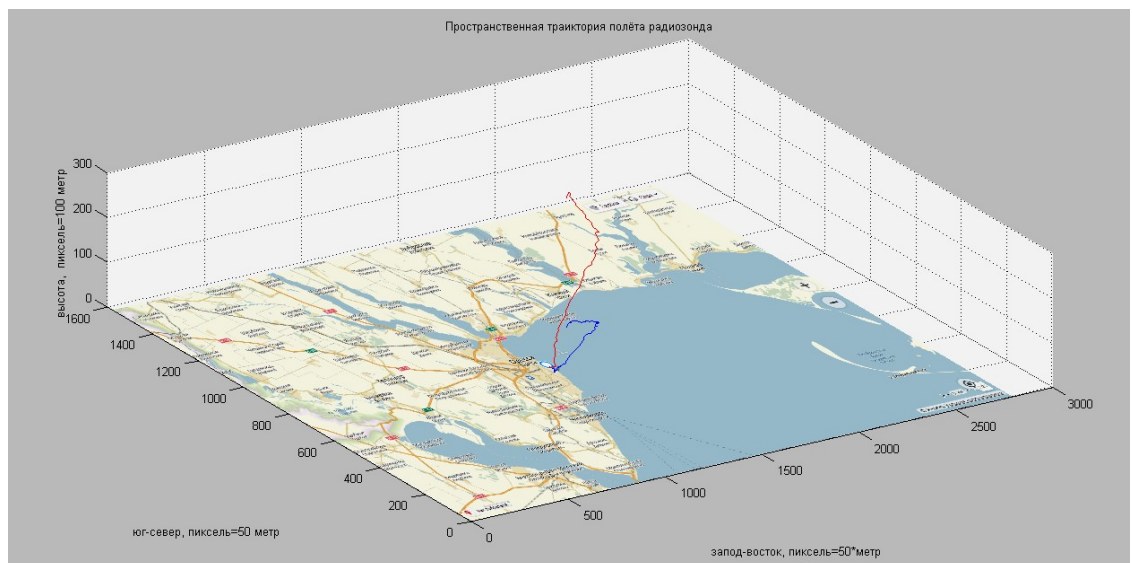


Рисунок 3.8 – Просторова траекторія польоту радіозонда

ВИСНОВКИ

З переміщеннями повітря в процесі загальної циркуляції атмосфери пов'язані основні зміни погоди. Повітряні маси, переміщаючись з одних областей Землі в інші, приносять різні умови по температурі, вологості і хмарності. Вітер викликає хвилювання водних поверхонь, океанічні течії, дрейф льодів, бере участь в процесах ерозії, рельєфні утворення і є найважливішим параметром для прогнозу погоди. Вітром називають рух повітря відносно земної поверхні, а вся система повітряних течій на Землі становить загальну циркуляцію атмосфери. Вихрові руху великого масштабу - циклони і антициклони, постійно виникаючі в атмосфері, роблять систему повітряних течій дуже складною.

На основі проведеного аналізу методів для вимірювання параметрів вітрової турбулентності нижньої тропосфери можна зробити висновок, що для дослідження процесів обміну в прикордонному шарі безпека польотів літаків, дифузія атмосферних домішок і інших прикладних задач, найбільш прийнятні когерентні доплерівські лідари. Використання когерентного випромінювання дозволяє реєструвати не тільки інтенсивність випромінювання, але також і його поляризацію, фазу і доплерівське зміщення, що дає додаткову інформацію.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Кисельов В.Н., Кузнєцов А.Д. Методи зондування навколишнього середовища / СПб .: Малоохтінській ін., 98, 1998. 428 с.
2. Павлов Н.Ф. Аерологія, радіометеорологія і техніка безпеки / СПб .: Ленінградська друкарня №8, 1980. 434с.
3. Толмачева, Н.И. Т 52 Аэрология (методы зондирования атмосферы): учеб- ник / Н.И. Толмачева, Н.А. Калинин; Перм. гос. нац. исследует. университет. Пермь, 2011. 336 с.
4. Посудін Ю.І. Методи вимірювання параметрів навколишнього середовища. К.: Світ, 2003. 288 с.
5. В.В.Стерлядкин, А.Г. Горелик, Г.Г.Щукин. Обзор методов и средств ветрового зондирования атмосферы. 42с.
6. Köpp F., Schwiesow R.L., and Werner Ch. //J. Climate Appl. Meteor., 1984. V.23. P.154.
7. Banakh V.A., Smalikho I.N., Köpp F., and Werner Ch. // J. Atmos. Oceanic Technol. 1999. V.16. №7. P.1061.
8. Abreu V.J., Barnes J.E., and Hays P.B. // Appl. Optics. 1992. V.31. №22. P. 4514.
9. Korb C.L., Gentry B.M., and Weng C.Y. // Appl. Optics. 1992. V.31. №21. P. 4213.
10. Ficher K.W., Abreu V.J., McGill M.J. et al. // Optical Engineering. 1995. V.34. №2. P.511.
11. Банах В.А., Смалихо И.Н. Когерентные доплеровские ветровые лидары в турбулентной атмосфере. Томск: изд.во Института оптики атмосферы СО РАН, 2013. 304 с.
12. Иванов В.Э., Фридзон М.Б., Ессяк С.П. Радиозондирование атмосферы // 2004, Екатеринбург, 596 с.

13. Радиозондирование атмосферы// [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ria-stk.ru/mi/adetail.php?ID=30717> (дата звернения 7.04.2017)
14. Крэкнелл А.П. Дистанционное зондирование в метеорологии, океанографии и гидрологии / А.П. Крэкнелл. М.: Мир, 1984. 320 с.
15. Кузнецов А.А. Радиолокационное оборудование автоматизированных систем управления воздушным движением / А.А.Кузнецов, А.И. Козлов, В.В. Криницын и др. М.: Транспорт, 1995. 344 с.
16. ДеМерс Майкл Н. Географические информационные системы / Майкл Н. ДеМерс. М.: Дата, 1999. 490 с.
17. Лазерный контроль атмосферы / под ред. Э.Дэ Хинкли. М.: Мир, 1979. 416 с.
18. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование / Р.Межерис. М.: Мир, 1987. 550 с.
19. Матвеев Л.Т. Физика атмосферы / Л.Т. Матвеев. СПб.: Гидрометеиздат, 2000. 778 с.
20. Мейсон Б.Д. Физика облаков / Б.Д. Мейсон. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 542 с.
21. Методические указания по приведению атмосферного давления к уровню моря и вычислению высот изобарических поверхностей на метеорологических станциях. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 49 с.
22. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Л.: Гидрометеиздат, 1985. Вып. 3, ч. 1. 157 с.
23. Наставление по метеорологическому обеспечению гражданской авиации России (НМО ГА. 951). М., 1995. 156 с.
24. Павлов Н.Ф. Аэрология, радиометеорология и техника безопасности / Н.Ф. Павлов. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 432 с.
25. Перевезенцев Л.Г. Радиолокационные системы аэропортов/ Л.Г. Перевезенцев, В.Н. Огарков. М.: Транспорт, 1991. 360 с.

26. Приборы и установки для метеорологических измерений на аэродромах / под ред. Л.П. Афиногенова, Е.В. Романова. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 295 с.

ДОДАТОК А. Графічна частина магістрської роботи

ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ

Магістерська робота за темою

«Застосування системи комп'ютерної математики для обчислення та візуалізації характеристик віту при радіозондуванні»

Виконав: ст. гр. МАГ-18

Поляков Д.С.

Керівник: доц. каф. АСМНС Гор'єв С. А.

Одеса – 2019

Рисунок А.1 – Тема роботи

ПОСТАНОВА ЗАДАЧІ

- У самих різних сферах життєдіяльності людини потрібна інформація про вітрові характеристики атмосфери. Потреба отримання даних про вітер в місцях, недоступних для установки датчиків, вимагає розвитку дистанційних методів вимірювання швидкості і напрямку вітру, які можуть забезпечувати вимірювання на значній відстані.
- Методи дистанційного зондування в цьому випадку дозволяють досягти високої точності, не спотворюючи результати шляхом впливу на навколишнє середовище.
- Потреба отримання даних про вітер в місцях, недоступних для установки датчиків, вимагає розвитку дистанційних методів вимірювання швидкості і напрямку вітру, які можуть забезпечувати вимірювання на значній відстані

☐ / ☐ ☐ ☐

Рисунок А.2 – Постанова задачі

- **Мета кваліфікаційної роботи магістра** – ознайомлення з основними методами аерологічних досліджень і методами визначення характеристик вітру у вільній атмосфері.
- **Об’єкт роботи** – Одержані дані від Одеського Гідрометцентру радіозонда радіотеодоліт-УЛ
- **Предмет роботи** – Розробка, моделювання та розрахунок напряму та швидкості вітру по первинним даним польоту радіозонда ГМ ЧАМ.
- **Засоби імітаційного моделювання** – пакет прикладних програм (ППП) «MATLAB».



Рисунок А.3 – Мета, об’єкт, предмет роботи

- В даний час найпоширеніші засоби вимірювань вітру - анемометри, які встановлюють на щоглах різної висоти. Але ці вимірювання мають контактний характер і не дозволяють отримати профіль вітру по висоті або його основні характеристики.
- Інший поширений тип приладів - радіозонди, які використовують піднімаючу оболонку з вимірювальними приладами, наповнену воднем або гелієм. Реєструючи за допомогою радіолокатора положення оболонки в просторі в різні моменти часу

Рисунок А.4 – Загальні відомості про вимірювання вітру

Для отримання інформації про вітер в усій товщі атмосфери необхідно використати такі штучні об'єкти, які б переміщалися не лише в горизонтальному, але і у вертикальному напрямках. Такими об'єктами є куле-пілот, радіопілот, радіозонд, вільні аеростати, а також метеорологічні ракети. Визначення швидкості и напрямку вітру с допомогою куле-пілотів обґрунтоване на вимірі координат кулі, випущеної у вільний політ в атмосферу, за певний інтервал часу. Для забезпечення виміру на різних висотах куле-пілот наповнюють легким газом (Боден, гелій). Такий куле-пілот, маючи підйомну силу, що визначена законом Архімеда, одночасно із захопленням його повітряним потоком піднімається вгору, поспідовно проходячи шари атмосфери.

Рисунок А.5 – Методи отримання інформації

На рисунку зображений шаропілотний трикутник OAB, де точка O - пункт спостереження або місце випуску кулі; точка A - місце розташування кулі; точка B - проекція кулі на площину, що проходить через точку O; ЮС - меридіан, що проходить через точку O. В цьому випадку $AB = H$ - висота кулі, $OB = L$ - горизонтальне віддалення кулі, $OA = r$ - похила дальність, кут - азимут, тобто кут, утворений лінією OB з меридіаном, кут - вертикальний кут, утворений лінією OA з горизонтальною площиною, що проходить через точку O.

Висота H - найкоротша відстань від об'єкта до горизонтальної площини, що проходить через РЛС, визначається за відомим з тригонометрії співвідношенням:

$$H = r \cdot \sin(\beta).$$

В окремих випадках важливо знати значення горизонтальної дальності:

$$L = r \cdot \cos(\beta).$$

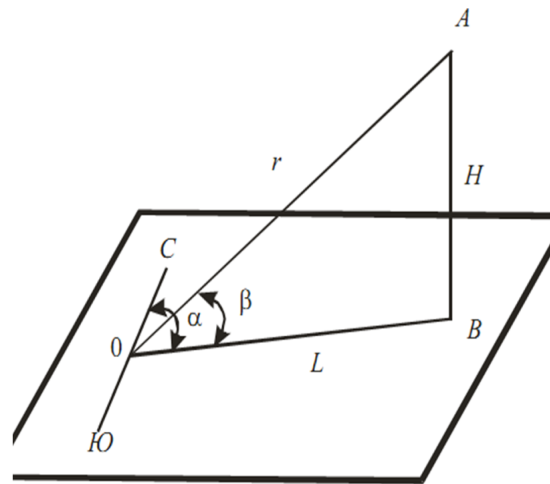


Рисунок А.6 – Зображення шаропілотного трикутника

Горизонтальні віддалення визначається для кожного моменту відліку кутів. За значеннями горизонтального віддалення и азимута будується Траєкторія Кулі. Висота Кулі $H = wt$, де w - вертикальна швидкість, а t - час. За відрізках, що з'єднує шкiрні пару сусідніх проєкцій кулі, можна судити про направлення и швидкості вітру в шарі, пройдений кулею за годину між двома послідовніми відліками. На рис. 1.5 точки A_1, A_2, A_3 и A_4 представляються положення куле-пілота в просторі для тих моментів спостереження, за якими проводиться обробка (для 1, 2, 3 и 4 хвилини спостережень); точки B_1, B_2, B_3 и B_4 - проєкції куле-пілота на горизонтальну площину в ті ж моменти; H_1, H_2, H_3 и H_4 - висоти кулі; L_1, L_2, L_3 и L_4 - горизонтальні віддалення кулі (рис

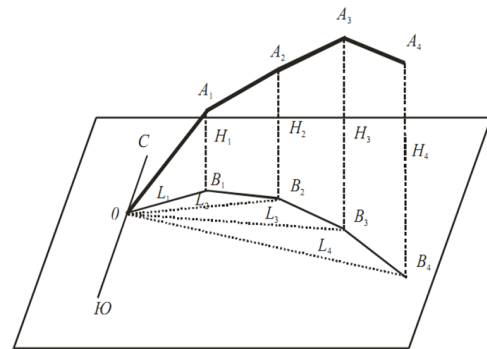


Рисунок А.7 – Горизонтальне визначення для кожного моменту відліку кутів

- Вертикальна швидкість підйому радіозонда обчислюється з точністю 1м / хв в шарах за 10-хвилинні інтервали часу шляхом ділення різниці висот в метрах на різницю часу в хвилинах.

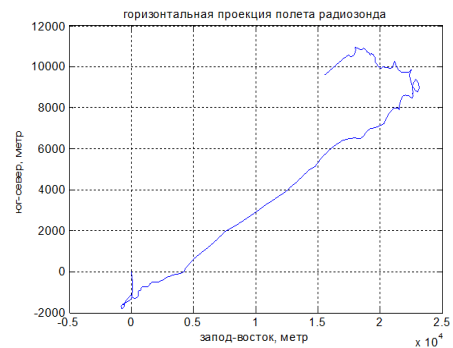


Рисунок А.8 – Вертикальна швидкість підйому радіозонда

- Побудова і візуалізація просторової траєкторії польоту радіозонда і вектора напрямку вітру.

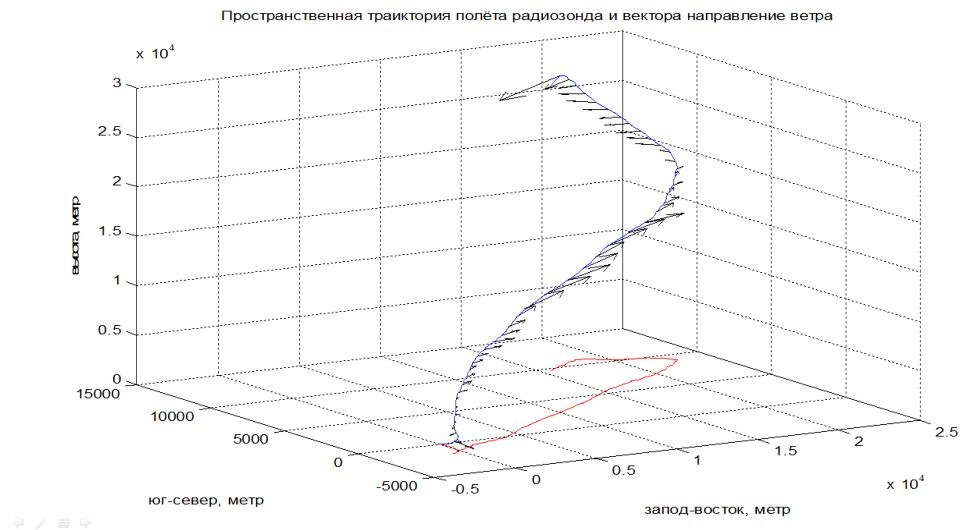


Рисунок А.9 – Візуалізація просторової траєкторії польоту

Висновки

- З переміщеннями повітря в процесі загальної циркуляції атмосфери пов'язані основні зміни погоди. Повітряні маси, переміщаючись з одних областей Землі в інші, приносять різні умови по температурі, вологості і хмарності. Вітер викликає хвилювання водних поверхонь, океанічні течії, дрейф льодів, бере участь в процесах ерозії, рельєфні утворення і є найважливішим параметром для прогнозу погоди. Вітром називають рух повітря відносно земної поверхні, а вся система повітряних течій на Землі становить загальну циркуляцію атмосфери. Вихрові рухи великого масштабу - циклони і антициклони, постійно виникаючі в атмосфері, роблять систему повітряних течій дуже складною.
- На основі проведеного аналізу методів для вимірювання параметрів вітрової турбулентності нижньої тропосфери можна зробити висновок, що для дослідження процесів обміну в прикордонному шарі безпека польотів літаків, дифузія атмосферних домішок і інших прикладних задач, найбільш прийнятні когерентні доплерівські лідари. Використання когерентного випромінювання дозволяє реєструвати не тільки інтенсивність випромінювання, але також і його поляризацію, фазу і доплерівське зміщення, що дає додаткову інформацію.

Рисунок А.10 - Висновки