

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**  
до СРС та виконання контрольної роботи з дисципліни  
"Розповсюдження радіохвиль"

Одеса 2010

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до самостійної роботи студентів при вивченні дисципліни  
"Розповсюдження радіохвиль"

для студентів 4 курсу

Спеціальність - Метеорологія  
Спеціалізація – Радіометеорологія та радіолокація

Затверджено  
на засіданні методичної комісії  
факультету комп'ютерних наук  
протокол № \_\_\_\_ від \_\_\_\_\_ 2010 р.

Одеса 2010

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до самостійної роботи студентів при вивченні дисципліни  
"Розповсюдження радіохвиль"

для студентів 4 курсу гідрометеорологічного інституту  
Спеціальність - Метеорологія  
Спеціалізація – Радіометеорологія та радіолокація

"Затверджено"

на засіданні методичної комісії  
факультету комп'ютерних наук  
протокол №\_\_ від \_\_\_\_ 2010 р.  
Голова комісії

\_\_\_\_\_ Коваленко Л.Б.

"Затверджено"

на засіданні кафедри АСМНС  
протокол №\_\_ від \_\_\_\_ 2010 р.  
Зав. каф. АСМНС

\_\_\_\_\_ Корбан В.Х.

Методичні вказівки до самостійної роботи студентів при вивченні дисципліни "Розповсюдження радіохвиль" для студентів 4 курсу денної форми навчання. Спеціальність – "Метеорологія", спеціалізація – "Радіометеорологія та радіолокація".

Укладач: Лімонов О.С., к.т.н. доцент – Одеса: ОДЕКУ, 2010.



## ЗМІСТ

1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА .....	4
1.1 Передмова .....	4
1.2 Зміст тем .....	4
1.3 При вивченні даних тем дисципліни використовується наступна навчальна і методична література .....	4
1.4 Перелік знань та вмінь .....	5
2 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ .....	5
2.1 Класифікація радіохвиль .....	5
2.2 Електричні параметри різних видів поверхні Землі .....	8
2.3 Будова та склад атмосфери .....	10
2.4 Електричні властивості атмосфери .....	11
2.5 Природа та будова іоносфери .....	17
3 КОНТРОЛЬНА РОБОТА .....	20
4 ОРГАНІЗАЦІЯ КОНТРОЛЮ ЗНАНЬ ТА ВМІНЬ СТУДЕНТІВ .....	

# 1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

## 1.1 Передмова

Теми самостійної роботи студентів з дисципліни "Розповсюдження радіохвиль" входять в робочу програму підготовки спеціалістів з спеціалізації "Радіометеорологія та радіолокація".

Метою вивчення даних тем дисципліни є: вивчення основних принципів і умов розповсюдження радіохвиль в різних шарах атмосфери.

Вивчення даних тем дисципліни базується на знаннях студентів з вищої математики, фізики, фізики атмосфери.

## 1.2 Зміст тем

Тема 1. Класифікація радіохвиль.

Тема 2. Електричні параметри різних видів поверхні Землі.

Тема 3. Будова та склад атмосфери.

Тема 4. Електричні властивості тропосфери.

Тема 5. Природа та будова іоносфери.

## 1.3 При вивченні даних тем дисципліни використовується наступна навчальна і методична література

### *Основна:*

1. Вельміскін Д.І., Перелигін Б.В. Розповсюдження радіохвиль: Конспект лекцій.-Одеса, Вид-во "ТЕС", 2007, 67 с.
2. Збірник методичних вказівок до практичних занять з дисципліни "Розповсюдження радіохвиль", Укладач: Перелигін Б.В., Вельміскін Д.І.-Одеса: ОДЕКУ, 2006.
3. Грудинская Г.П. Распространение радиоволн. – М.: Высшая школа, 1975.
4. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн. – М.: Сов. радио, 1972.

### *Додаткова:*

5. Красюк Н.П., Дымович Н.Д. Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Высшая школа, 1974.
6. Справочник по теоретическим основам радиоэлектроники. Под. ред. Б.Х. Кривицкого. Том 1. – М.: Энергия, 1977.

## 1.4 Перелік знань та вмінь

### Знати:

- класифікацію радіохвиль;
- електричні параметри різних видів поверхні Землі;
- будову іоносфери.

### Вміти:

- розраховувати електричні параметри тропосфери і іоносфери;
- Розрахувати зону виявлення МРЛ.

## 2 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

### 2.1 Класифікація радіохвиль

Радіохвилі (РХ) - електромагнітні хвилі в діапазоні частот від 0,001 до  $10^{12}$  Гц. Весь спектр РХ поділяють умовно по десятковому принципі на окремі діапазони (табл.2.1).

Таблиця 2.1 – Діапазони радіохвиль

Діапазон		Частота	$\lambda$	
РХ ІЗ і ЗВ частот		$3 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 10^3$ Гц	$10^8 - 10^2$ км	
НДХ		$3 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^4$ Гц	100-10 км	
ДХ		30-300 кГц	10-1 км	
СХ		0,3-3 МГц	1000-100 м	
КХ		3-30 МГц	100-10 м	
УКХ	мх		3-300 МГц	10-1 м
	НВЧ	дмх	0,3-3 ГГц	100-10 см
		смх	3-30 ГГц	10-1 см
	ммх		30-300 ГГц	10-1 мм
ОРХ	ІЧ-промені	0,3-400 ТГц	1 мм-0,75 мк	
	Видимі промені	400-750 ТГц	0,75-0,4 мк	
	УФ-промені	750-3000 ТГц	0,4-0,1 мк	

Постійне удосконалювання техніки дозволяє розширювати класифікаційні параметри.

РХ, що поширюються в однорідному або слабо неоднорідному середовищі (наприклад у космічному просторі) по прямолінійних траєкторіях (або близьких до них) називають вільно розповсюджуваними або прямими хвилями.

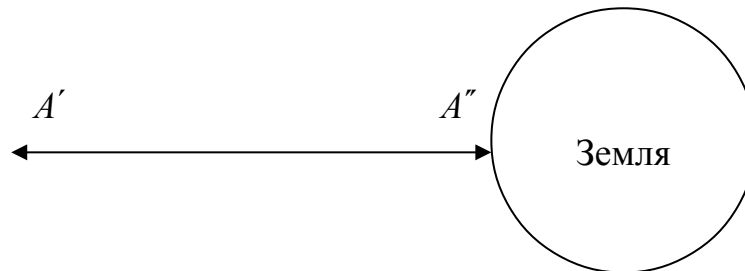


Рис. 2.1 – Прямі хвилі

У більшості випадків маємо радіотраси уздовж поверхні Землі, а її близькість виявляється у виді 3-х чинників:

- вплив близькості і сферичної форми Землі
- вплив неоднорідності тропосфери (до 15 км)
- вплив іоносфери (від 60 до 600 км)

РХ, що поширюються в безпосередній близькості від поверхні Землі і обгинають частково опуклість земної кулі внаслідок явища дифракції називаються земними або поверхневими хвилями.

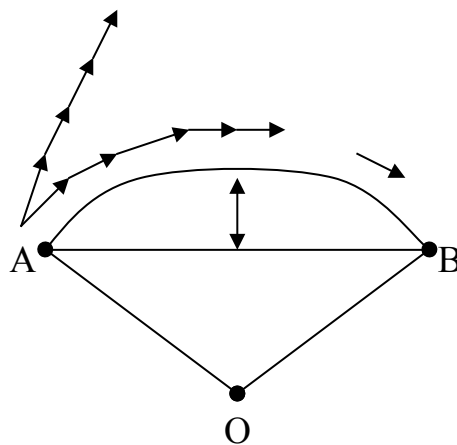


Рис. 2.2 – Земні хвилі

- напівпровідна поверхня викривляє структуру РХ,
- поглинається частина РХ,
- дифракція через сферичну форму Землі:



L, км	1	5	10	50	100	500	1000	5000
h, км	0,031	0,78	3,1	78	310	7800	$3,1 \cdot 10^4$	$3,75 \cdot 10^5$

РХ, що поширюються на значні відстані (до 1000 км) за рахунок розсіювання в тропосфері і направляючої (хвільоводної) дії тропосфери називаються тропосферними хвилями. Як тропосферні можуть поширюватися хвилі з  $\lambda < 10$  м (ці хвилі слабо дифрагують).

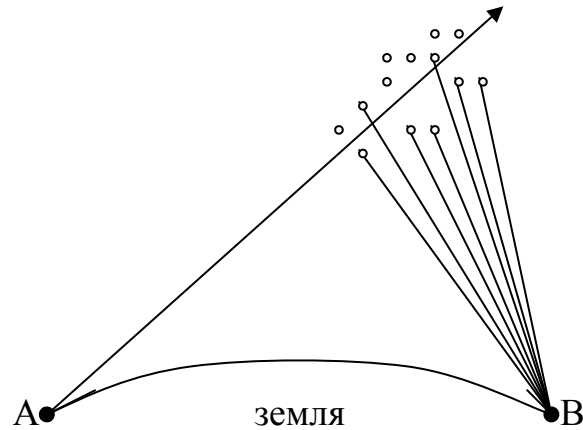


Рис. 2.3 – Тропосферні хвилі

Тропосфера неоднорідна, під дією метеофакторів спостерігаються як суцільні, так і локальні зміни коефіцієнта заломлення.

При визначених метеоумовах у приземному прошарку виникають області різкого зменшення коефіцієнта заломлення з висотою і це дозволяє хвилям із  $\lambda < 3$  м поширюватися до 800-1000 км за рахунок хвільовідної дії тропосфери.

Міжнародна комісія з аеронавігації в 1925 р. прийняла критерій нормальної тропосфери:  $P_0 = 0,1013$  мПа;  $T = 288K$ ;  $S = 69\%$ ;  $H < 11$  км.

РХ, що поширюються на великі відстані і обгинають земну кулю в результаті однократного або багатократного відбиття від іоносфери (у діапазоні хвиль  $e_a > 10$  м), а також хвилі, що розсіюються на неоднорідностях іоносфери і відбиваються від іонізованих слідів метеорів (у діапазоні метрових хвиль) називаються іоносферними або просторовими хвилями.

## 2.2 Електричні параметри різних видів поверхні Землі

Розповсюдження земних РХ відбувається безпосередньо над поверхнею Землі, що є напівпровідною. Тому необхідно знання електричних параметрів різних видів поверхні Землі, їх урахування.

Велика частина поверхні (71%) вода. З погляду електричних властивостей (діелектричної проникності і питомої електричної провідності) розрізняти потрібно солону воду морів і океанів, озер, річок. Поверхня може бути дзеркально гладкою і бути покрита хвилями різної висоти (до десяти метрів). Подібну картину утворюють льоди.

Грунт: вологий у виді полів, лук, ріллі; такий ж, але покритий чагарниками і деревами; сухий у виді пісків; горбкуватий з рослинністю; скелястий без рослинності і т.д.

При вивченні особливостей розподілу земних хвиль доводиться ідеалізувати умови, у яких протікають процеси РРХ і в глибину Землі. Реальний плідючий грунт замінюють уявленим однорідним, що робить таку ж дію поглинання, як і реальний грунт. При практичних розрахунках задовільняються тим, що беруть до уваги тільки різкі зміни в умовах РРХ (берегова лінія, межа поле-ліс і т.д.)

Різновиди земної поверхні можна розбити на 2 групи: поверхні, що характеризуються незначними нерівностями, тому їх можна замінити складеною поверхнею з тими ж електричними параметрами; поверхні, що мають значні нерівності і котрі повинні замінити згладженою поверхнею з еквівалентними електричними параметрами.

Існують спеціальні карти по грунтах. Є вони і для України.

В таблиці 2.2 наведені електричні характеристики різних видів поверхні Землі.

Таблиця 2.1 – Деякі електричні характеристики земної поверхні (для діапазону СХ)

	Діапазон характеристик		Середні значення	
	$\epsilon$	$\sigma$ , Сим/м	$\epsilon$	$\sigma$ , Сим/м
Морська вода	80	1-4,3	80	4
Прісна вода	80	$10^{-3} - 2,4 \cdot 10^{-2}$	80	$10^{-3}$
Вологий грунт	10-30	$3 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 10^{-2}$	10	$10^{-2}$
Сухий грунт	3-6	$1,1 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-3}$	4	$10^{-3}$
Ліси			еквів.	$10^{-3}$
Значні міста			зна-ня	$7,5 \cdot 10^{-4}$
Гориста місцевість				$7,4 \cdot 10^{-4}$

### 2.2.1 Неоднорідний грунт, берегова рефракція

Загальне рішення отримане в ряді робіт Г.А. Гринберга, В.А.Фока, Є.Л. Фейнберга.

Передбачається  $[\varepsilon] \gg 1$  і застосовуються межові умови Леонтовича.

1 випадок:

РХ частину шляху  $r$ , проходять над сушею, а частину шляху  $r_2$  - над морем ( $\sigma \gg 1$ ), крім того, якщо  $x_{1r_1} \gg 1$ , тоді множник ослаблення

$$F = \frac{1}{2x_{1(r_1+r_2)}} \sqrt{1 + \frac{4}{\pi} x_{1(r_1+r_2)} \frac{r_2}{r_1}}.$$

За ним побудуємо графіки.

2 випадок:

визначається множник ослаблення в загальному випадку, коли обидва ґрунти мають кінцеву провідність, і якщо чисельні відстані для обох ґрунтів великі ( $x_{21} \gg 1$ ), то

$$F \approx \frac{\sqrt{S_1 S_2}}{2(r_1 + r_2)},$$

де  $S_1 = \frac{60\lambda^2\sigma_1}{\pi}$  - масштаб відстані для ґрунту 1 виду,

$S_2 = \frac{60\lambda^2\sigma_2}{\pi}$  - масштаб відстані для ґрунту 2 виду,

або

$$F \approx \frac{1}{2\sqrt{\frac{r_1+r_2}{S_1} \frac{r_1+r_2}{S_2}}}.$$

Виразимо  $S$  через  $x$

$$F \approx \frac{1}{2\sqrt{x_{1(r_1+r_2)} x_{2(r_1+r_2)}}}$$

при  $x \gg 1$ ,  $F \approx \frac{1}{2}x$ :

$$F \approx \sqrt{F_{1(r_1+r_2)} F_{2(r_1+r_2)}},$$

тобто середньому геометричному множників ослаблення, обчислених для однорідних трас довжини  $(r_1 + r_2)$  з параметрами 1 і 2 ґрунтів.

Аналогічні розрахунки множника ослаблення були проведені Фейнбергом для трьох послідовних ділянок із різною провідністю, причому крайні були однаковими й однієї довжини (типу море - суша -

море і суша - море - суша). Аналіз одержаних результатів показав, що коли до передавача і приймача прилягає суша, то навіть невеличкі ділянки суші викликають різке і значне збування множника ослаблення. Різке його ослаблення настає тільки тоді, коли суша впритул підходить до РПП або РПрП.

В тому числі, при поширенні земних хвиль внесене окремою ділянкою ослаблення (поглинання) залежить від місця розташування ділянки на трасі. Найбільше поглинання викликають ділянки, що прилягають безпосередньо до антен РПП і РПрП, тобто поблизу них РХ поширюються в безпосередній близькості від Землі та відчувають поглинальну дію ґрунту. А при видаленні від РПП РХ як би піднімаються над Землею і відчувають менший вплив Землі.

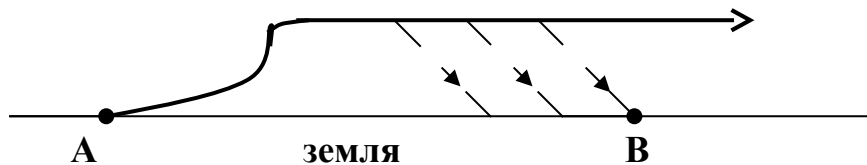


Рис. 2.4 – Розповсюдження РХ над неоднорідним ґрунтом

### 2.3 Будова та склад атмосфери

Атмосферу Землі поділяють на три шари - тропосферу, стратосферу та іоносферу (рис. 2.5).

Тропосфера - нижній шар атмосфери висотою до 10-12 км над середніми широтами (над полюсами нижче, над екватором вище).

Стратосфера - середній шар висотою до 60 км.

Ці два шари складаються з молекулярного азоту (78%), молекулярного кисню, водню, вуглекислого газу й інших домішок. Але в тропосфері значно більше парів води, а в стратосфері більша кількість озону. Це визначає особливості їх нагріву, тропосфера нагрівається від поверхні землі і тому температура її з висотою зменшується. Нагрівання стратосфери пояснюється головним чином поглинанням ультрафіолетових променів озоном, тому температура в ній із збільшенням висоти зростає, а потім знову падає (до 50 км зростає концентрація озону, а потім знову падає).



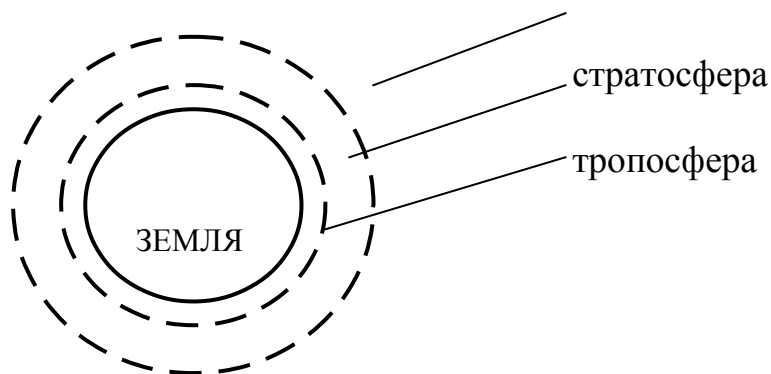


Рис.2.5 – Шари атмосфери

Іоносфера - верхній шар атмосфери, має протяжність до 5 земних радіусів. Гази в прошарку іонізовані, велика кількість електронів і іонів. Температура й іоносфери зростає з висотою, досягаючи (2000-3000) К на висоті 500-600 км.

Тропосфера і стратосфера утворюють нейтросферу. Тому закономірності РРХ у них, в основному, однакові. Але в тропосфері метеорологічні зміни значно більш інтенсивні, тому процес РРХ тут більш складний. Це дозволяє дослідження РРХ в неіонізованій частині атмосфери обмежити розглядом процесів у тропосфері.

## 2.4 Електричні властивості атмосфери

Характер РРХ у тропосфері визначається її станом. Стан тропосфери визначається її фізичними характеристиками - температурою, тиском, вологістю, які змінюються зі зміною погоди.

Для з'ясування впливів метеоумов на РРХ встановимо зв'язок між метеорологічними параметрами тропосфери і її електричними параметрами.

Електричними параметрами тропосфери є: питома провідність  $\sigma$ , відносні магнітна проникність  $\mu$  і електрична проникність  $\epsilon$ .

Розглянемо вплив кожного з цих параметрів на РРХ.

Провідність газів тропосфери у всіх діапазонах, за винятком міліметрового, практично дорівнює нулю.

Абсолютна магнітна проникність у всій атмосфері

$$\mu_a = \mu_o, \text{ тобто } \mu = 1$$

Діелектрична проникність змінюється з висотою. Вона залежить від температури, вологості і тиску і з висотою зменшується.

При проходженні електромагнітних хвиль (ЕМХ) крізь газу, під впливом змінного електричного поля (ЕП) відбувається їх поляризація, що характеризується вектором поляризації.

$$\bar{P} = \epsilon_0 \chi \bar{E}$$

де  $\chi = \epsilon - 1$  - електрична сприйнятливості речовини. Вона кількісно характеризує взаємодію двох форм матерії - речовини і електромагнітне поле (ЕМП).

Відповідно до молекулярної теорії речовини, якщо молекули не мають постійного дипольного моменту, то

$$\chi = \frac{A \cdot P}{T^0},$$

а якщо молекули мають постійні дипольні моменти, то

$$\chi = \frac{B \cdot P}{T^{02}}$$

де  $P$  - тиск,

$T^0$  - абсолютна температура,

$A = 155,2 \cdot 10^{-6}$  і  $B = 7,4 \cdot 10^{-4}$  - визначені постійні коефіцієнти.

Молекули всіх газів тропосфери, крім парів води, не мають постійного дипольного моменту, а пари води мають його.

Сприйнятливості суміші газів дорівнює сумі сприйнятливостей окремих газів. Тому

$$\chi = \epsilon - 1 = \frac{AP}{T^0} + \frac{Bl}{T^{02}}$$

де  $l$  - тиск водяної пари в мілібарах.

Очевидно, що діелектрична проникність залежить від температури, тиску, вологості (від неї залежить тиск водяних парів), а вони змінюються в часі і від точки до точки, тобто тропосфера - середовище неоднорідне.

Врахуємо, що  $n = \sqrt{\epsilon}$ , тоді

$$\epsilon - 1 = n^2 - 1 = (n - 1)(n + 1) \approx 2(n - 1)$$

Використовуючи ці вирази, можна одержати

$$n = 1 + \frac{79 \cdot 10^{-6}}{T^0} \left( P + \frac{4810l}{T^0} \right).$$

Звідси, коефіцієнт переломлення в тропосфері - функція метеоумов.

### 2.4.1 Явище атмосферної рефракції

Розіб'ємо умовно тропосферу на шари. Вважаємо в межах кожного прошарку  $\varepsilon = const$ . Звичайно з висотою  $\varepsilon$  зменшується.

$$\varepsilon_1 > \varepsilon_2 > \varepsilon_3 .$$

За законом переломлення

$$\frac{\sin \varphi_2}{\sin \varphi_1} = \frac{\sqrt{\varepsilon_1}}{\sqrt{\varepsilon_2}} = \frac{n_1}{n_2}$$

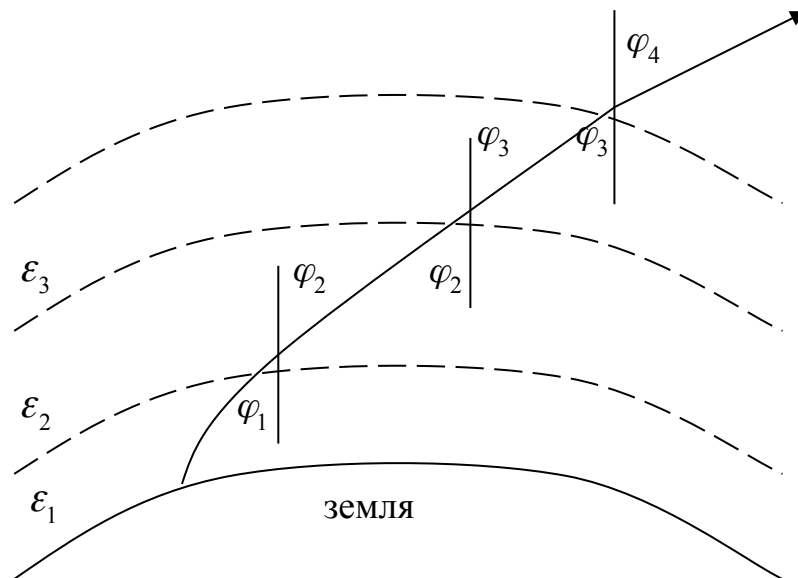


Рис. 2.6 - Хід променя в тропосфері

Тому  $\varphi_1 < \varphi_2 < \varphi_3 \dots$  і промінь іде по ломаній лінії. Але реально шарів немає; тиск, температура і вологість змінюються плавно, через що плавно змінюється і  $n$ . Тому траєкторія променя - плавна крива.

напря́м антени

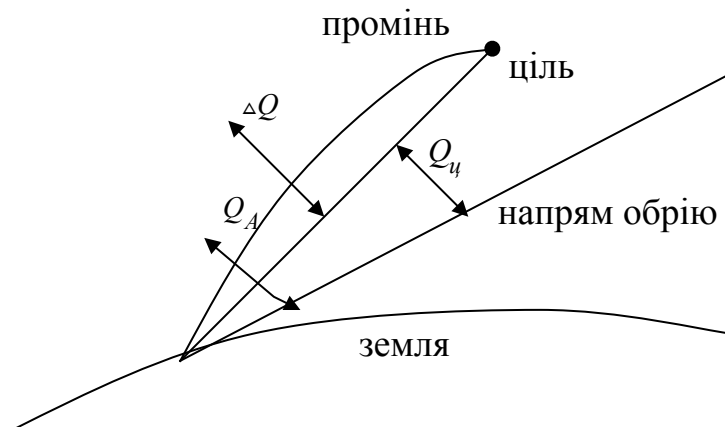


Рис 2.7 - Хід променя в реальній тропосфері

Викривлення променя і є явищем тропосферної рефракції.

Рефракція створює помилку у визначенні куту місця цілі, а значить і у визначенні висоти цілі. Її треба враховувати. Рефракція впливає і на дальність дії РЛС.

#### 2.4.2 Види рефракції, надрефракція

Ступінь викривлення траєкторії радіохвилі в тропосфері характеризують радіусом кривизни променя.

$$R = - \frac{1}{\frac{dn}{dh}},$$

де  $\frac{dn}{dh}$  - градієнт коефіцієнта заломлення по висоті.

Види рефракції класифікуються в залежності від градієнта  $n$  по висоті.

##### а) Позитивна рефракція.

Коефіцієнт заломлення зменшується з висотою. Фазова швидкість хвилі  $v_\phi = \frac{c}{n}$  із зростанням  $h$  збільшується, верхня межа фронту хвилі рухається швидше за нижню, траєкторія наближається до землі, радіус



кривизни позитивний (траєкторія обернена опуклістю нагору), рефракція називається позитивною.

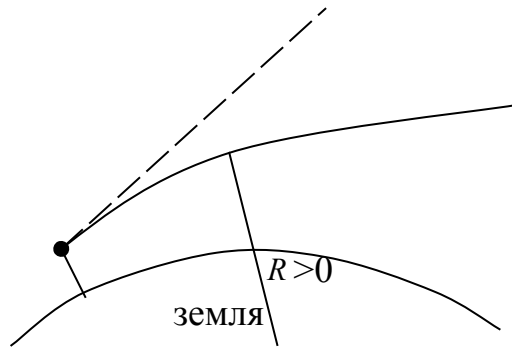


Рис. 2.8 - Позитивна рефракція

Чим більше градієнт, тим більше викривлення променя.

Три часткових випадка:

1) нормальна рефракція

$$\frac{dn}{dh} = -4 \cdot 10^{-8} \text{ м}^{-1}$$

виникає при нормальному стані тропосфери, тобто коли  $T^0$  й  $\ell$  убувають із висотою за лінійним законом:

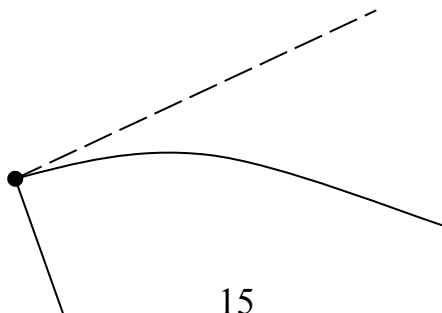
В цьому випадку радіус кривизни променя

$$R = \frac{10^8}{4} = 25000 \text{ км} \approx 4R_3.$$

2) критична рефракція

$$\frac{dn}{dh} = -\frac{1}{R_3} = -1,57 \cdot 10^{-7} \text{ м}^{-1}$$

Кривизна променя дорівнює кривизні земної поверхні. Дальність дії РЛС могла б бути необмеженою.



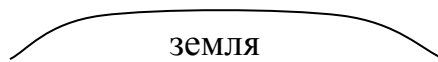


Рис. 2.9 - Критична рефракція

### 3) надрефракція

$$\frac{dn}{dn} < -1,57 \cdot 10^{-7} \text{ м}^{-1}$$

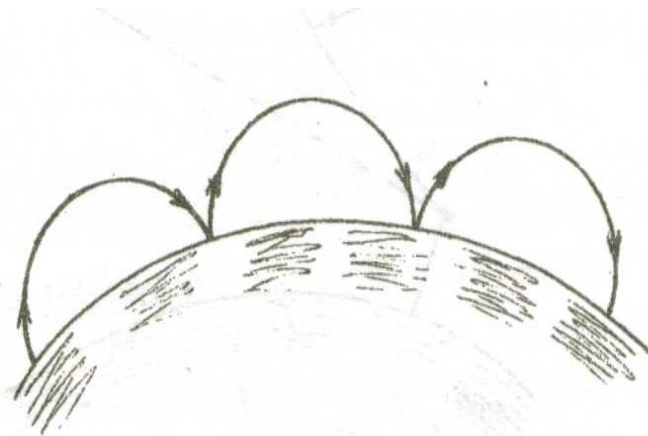


Рис. 2.10 - Надрефракція

Кривизна променя більше кривизни Землі. Промінь після повного внутрішнього відбиття в тропосфері повертається на Землю, може відбитися від неї і т.д. Виникає «атмосферний хвилевід» - утворюється наддалеке РРХ на багато сотень кілометрів. Можливо утворення такого "атмосферного хвилеводу" і вище земної поверхні. Це явище нерегулярне, тому його не можна використовувати. Воно створює перешкоди за рахунок різкого збільшення поля від далеких станцій.

Надрефракція виникає при температурній інверсії, коли розташовані вище шари повітря тепліші за нижні. Вона спостерігається в прибережних районах, тому що тут влітку в ранкові часи нижні шари повітря більш охолоджені і насичені вологою, чим верхні.

Надрефракція пояснює таке явище як міражі. В основі міражів реальна місцевість, предмети, що знаходяться дуже далеко від спостерігача; їх зображення передається далеко завдяки особливим умовам в атмосфері. Таким чином, міражі – це не гра надприродних сил, а явище цілком закономірне, що виявляється в матеріальному середовищі - повітрі. На Венері надрефракція спостерігається завжди, тому що там тиск дуже швидко падає з висотою.

### б) Негативна рефракція.

$$\frac{dn}{dn} > 0.$$

$n$  збільшується з висотою, траєкторія обернена опуклістю униз (радіус кривизни спрямований вниз)

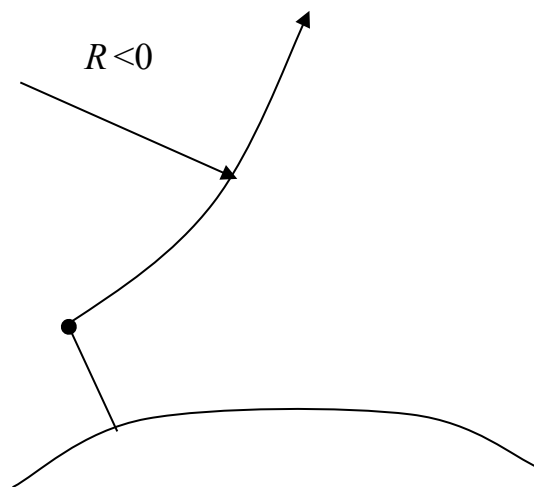


Рис. 2.11 - Негативна рефракція

## 2.5 Природа та будова іоносфери

Іоносфера істотно впливає на РРХ всіх діапазонів. Але на поширення хвиль різних діапазонів вона впливає по-різному. Завдяки іоносфері радіохвилі поширюються навколо Землі на дуже великі відстані, навіть при малих потужностях передавачів. Припущення про вплив верхньої частини атмосфери на РРХ вперше було висловлено в 1902 р після здійснення трансатлантичного радіозв'язку. Майже одночасно Кеннелі (США) і Хевісайд (Англія) припустили, що у верхніх шарах атмосфери є позитивні і негативні іони. Ці іони утворюють провідний шар - іоносферу, від якої і відбиваються радіохвилі.

Іоносфера - верхня частина земної атмосфери від висот 60 км до декількох радіусів Землі (20000-25000 км). Верхня межа встановлена порівняно, нещодавно за допомогою ШСЗ, до цього вважалося, що вона складає 500-600 км.

Основні особливості іоносфери такі:

1. Іоносфера має шарувату будову речовини, тому що на висотах більш 90 км немає сильних вертикальних і горизонтальних потоків, немає перемішування. Гази (в основному азот і кисень) можуть знаходитися в молекулярному й атомарному стані.

1. В іоносфері існує високий ступінь концентрації вільних електронів і іонів. Речовина іоносфери знаходиться в четвертому, плазменому стані. Ступінь іонізації характеризується електронною концентрацією  $N_e$ , що показує число вільних електронів в одиниці об'єму.

3. Є декілька максимумів  $N_e$  на різних висотах, що називаються шарами іоносфери і позначаються буквами  $D$ ,  $E$ ,  $F_1$ ,  $F_2$ . Зі збільшенням висоти  $N_e$  в шарах збільшується.

Іонізація газів іоносфери відбувається за допомогою електромагнітних випромінювань і за допомогою частин, що рухаються.

Природними джерелами іонізації іоносфери є:

1. Рентгенівське і жорстке ультрафіолетове випромінювання Сонця. Це основне джерело іонізації.

2. Корпускулярне випромінювання Сонця. Його дія приблизно в 2 рази менше дії першого джерела.

3. Випромінювання зірок. Його дія складає  $10^{-4}$  від дії першого чинника.

4. Космічні промені високої енергії. Їхня дія складає  $10^{-8}$  від дії ультрафіолетових променів Сонця.

5. Метеорна речовина, попадаючи в атмосферу, розігрівається та іонізує газу.

Стан іоносфери безупинно змінюється - періодично і випадково. Періодичні зміни - добові, сезонні, 11 - річні і 100 - річні. Останні два пов'язані з періодичністю сонячної активності. Добові зміни пов'язані з тим, що з настанням темноти електронна концентрація  $N_e$  в прошарках  $E$  і  $F_2$  поступово зменшується, а в прошарках  $D$  і  $F_1$  дуже швидко відбувається повна деіонізація.

Випадкові зміни  $N_e$  відбуваються через сонячні спалахи, збудження магнітного поля Землі, вторгнення в атмосферу метеорних потоків.

### **2.5.1 Електричні параметри іоносфери, фазова і групова швидкості радіохвиль в іоносфері**

Наявність великого числа вільних електронів впливає на властивості іоносфери. Вирази, що описують відносну діелектричну проникність, коефіцієнт заломлення і провідність іоносфери, відповідно мають вигляд:

$$\varepsilon_v = 1 - 80,8 \frac{N_e \left( \frac{\text{електронів}}{\text{м}^3} \right)}{f^2 [\text{Гц}]},$$

$$n_u = \sqrt{1 - 80,8 \frac{N_e}{f^2}},$$

$$\sigma_u = 7 \cdot 10^{-10} \frac{N_e \nu}{f^2},$$

де  $\nu$  - число зіткнень електронів із молекулами в одну секунду.

Видно, що  $\varepsilon_v$ ,  $n_u$  і  $\sigma_u$  - функції частоти й електронної концентрації.

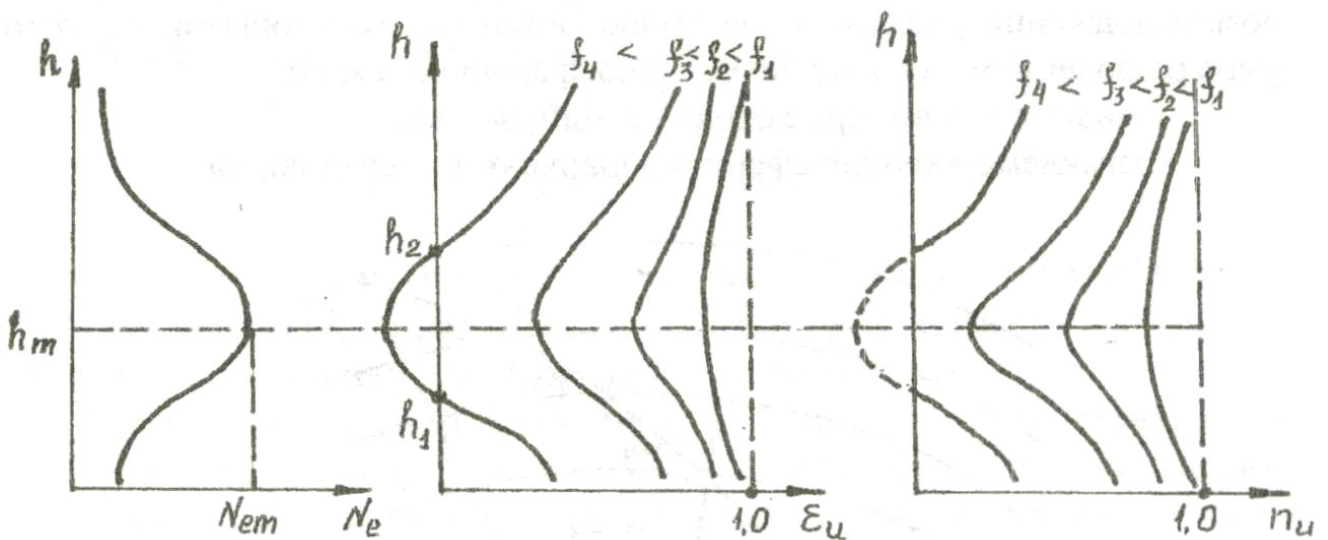


Рис. 2.12 - Залежність характеристик іоносфери від електронної концентрації і частоти

З формул і графіків можна зробити такі висновки:

1. Внаслідок залежності  $N_e$  від висоти,  $\varepsilon_u$ ,  $n_u$ ,  $\sigma_u$  змінюються з висотою, тобто іоносфера – електрично неоднорідне середовище.
2. Зі збільшенням частоти неоднорідність іоносфери виявляється меншою мірою.

3. Фазова і групова швидкості - функції коефіцієнта заломлення:  
 $v_{\phi} = \frac{c}{n}; v_{gp} = cn$ .

Але в іоносфері  $n$  залежить від  $f$ . Отже, в іоносфері  $v_{\phi}$  і  $v_{gp}$  залежать від частоти, тобто іоносфера – диспергуюче середовище: із ростом частоти  $v_{\phi}$  зменшується (нормальна дисперсія). Дисперсія призводить до викривлення форми сигналу. Ці викривлення тим сильніші, чим сильніше виражена дисперсія, чим ширше спектр сигналу і більше довжина шляху, який проходить хвиля в іоносфері. Викривлення форми сигналу впливає на точність визначення дальності. В діапазоні сантиметрових і дециметрових хвиль викривлення сигналів малі, тому що  $f \gg 80,8 N_e$ .

4. З вираження для  $\sigma_i$  очевидно, що зі збільшенням  $f$  і зменшенням  $v$  (тобто зі зменшенням щільності атмосфери) провідність, а отже і загасання, внесені іоносферою, зменшуються. Виходить, більш короткі хвилі проходять іоносферу з меншим поглинанням.

### 3 КОНТРОЛЬНА РОБОТА

Контрольна робота складається з завдань

#### Завдання 3.1

Визначити висоту допустимої нерівності на майданчику для РЛС при розповсюдженні електромагнітної хвилі з частотою  $f$  і кутом піднесення  $\theta$ . Вирішіть задачу при конкретних даних.

Таблиця 3.1

Варіант №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$f$ , МГц	50	100	150	200	300	500	1000	2000	3000	10000
$\theta$ , град.	10°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	60°	80°

#### Завдання 3.2

Визначити радіус майданчика для РЛС з висотою антени  $h$  і частотою випромінювання  $f$ .

Таблиця 3.2

Варіант №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$f$ , МГц	100	200	300	500	1000	2500	3000	6000	9000	10000
$h$ , м	2	4	6	8	10	12	3	5	9	3

### Завдання 3.3

Електромагнітна хвиля горизонтальної поляризації відбивається від провідної Землі з кутом підвищення  $\theta$ , відносна діелектрична проникність землі  $E$ . Визначити комплексний коефіцієнт відбиття.

### Завдання 3.4

Електромагнітна хвиля горизонтальної поляризації відбивається від діелектричного середовища з відносною діелектричною проникністю  $E$  і кутом підвищення  $\theta$ . Визначити коефіцієнт відбиття  $R_r$ . Вирішити задачу при конкретних даних.

Таблиця 3.3

Варіант №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$E$ , Ф	2,3	2,5	9	10	6,5	8	10	80	2,5	9
$\theta$ , град	10°	20°	25°	35°	50°	60°	15°	45°	30°	35°

### Завдання 3.5

Розрахувати величини максимумів множника Землі для горизонтальної поляризації і їх напрям за умови, що Земля – ідеальний провідник, висота антени  $h_A$ , довжина хвилі випромінення  $\lambda$ . Вирішити задачу при конкретних даних.

Таблиця 3.4

Варіант №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$h$ , м	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$h_A$ , м	1	3	10	6	8	9	12	15	30	20
$\lambda$ , м	1	3	2	0,1	0,2	0,3	5	0,03	10	0,05

### Завдання 3.6

Розрахувати напрямів шумів множника Землі за умови, що Земля – провідник, висота антени  $h_A$ , частота випромінення  $f$ . Вирішити задачу при конкретних даних.

Таблиця 3.5

Варіант №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$h$ , м	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$h_A$ , м	1	3	10	6	8	9	12	15	30	20
$f$ , МГц	300	100	150	200	500	900	1200	2000	3000	9000

### Завдання 3.7

Розрахува напрям максимумів множника Землі, якщо електромагнітна хвиля вертикальної поляризації відбивається від ідеально провідної Землі. Висота антени  $h_A$ , частота випромінення  $f$ . Вирішити задачу при конкретних даних.

Таблиця 3.6

Варіант №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$h$ , м	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$h_A$ , м	1	10	6	3	5	9	8	12	15	30
$f$ , МГц	300	100	150	200	500	900	1200	2000	3000	9000

### Завдання 3.8

Розрахувати напрям мінімумів множника Землі, використовуючи дані таблиці 3.6.

### Завдання 3.9

Розрахувати проміжні напрями  $\theta_{r\delta}$  множника Землі, якщо електромагнітна хвиля горизонтальної поляризації відбивається від Землі – діелектрика. Висота антени  $h_A$ , частота випромінення  $f$ . Вирішити задачу при конкретних даних, використовуючи дані таблиці 3.4.

### Завдання 3.10

Розрахувати кут повного заломлення (кут Брюстера) електромагнітної хвилі з вертикальною поляризацією, яка падає на Землю – діелектрик з відносною діелектричною проникністю  $A$ . Вирішити задачу при конкретних даних.

Таблиця 3.7

Варіант №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-----------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----



А, Ф	2	2,3	2,5	9	30	6	10	20	25	40
------	---	-----	-----	---	----	---	----	----	----	----

#### 4 ОРГАНІЗАЦІЯ КОНТРОЛЮ ЗНАНЬ І ВМІНЬ СТУДЕНТІВ

Контроль знань та вмінь студентів, що навчаються за денною формою, здійснюється за допомогою системи контролюючих заходів.

Поточний контроль здійснюється на протязі всього навчального семестру та включає заходи контролю самостійної роботи студента під час вивчення навчальної дисципліни поза межами університету шляхом усного опиту та роботи студента на практичних заняттях і теоретичної модульної контрольної роботи.

Оцінки самостійної роботи студента здійснюється у формі оцінки відповідей на контрольні запитання. При цьому при усному опиті для оцінки кожного питання використовується від 0 до 5 балів:

"0" – немає відповіді на питання або дана відповідь не на сформульоване в питанні – тобто студент не зрозумів питання;

"1" – студент зрозумів питання, намагався відповісти, але не вірно;

"2" – студент зрозумів питання, намагався на нього відповісти, але знань недостатньо для позитивної оцінки;

"3" – відповідь в основному вірна, але не повна або висвітлені основні положення питання, але є помилки, які викривляють відповідь;

"4" – студент показує добрі знання з питання, грамотно будує відповідь, не допускає істотних неточностей або помилок;

"5" – студент показав глибокі та повні знання передбаченого програмою матеріалу, грамотно і логічно будує відповідь, записи зроблені акуратно.