

**Аналіз і синтез випромінюючих систем**

**Вплив тропосфери та іоносфери  
на поширення радіохвиль**

## Загальні положення

**Тропосфера** – нижня область атмосфери, яка містить близько 80 % всієї маси повітря. У помірних широтах верхня границя тропосфери лежить на висоті близько 11 км. Температура тропосфери, яка нагрівається земною поверхнею, зменшується з висотою та стабілізується на межі верхньої границі; у результаті конвекції повітряна маса тропосфери перебуває у русі. Діелектрична проникність тропосферного середовища, тобто повітря з домішкою водяної пари, доволі близька до одиниці. У середньому поблизу поверхні Землі  $n = \sqrt{\varepsilon} = 1,000325$ , а з висотою коефіцієнт заломлення  $n$  все більше наближається до одиниці, зменшуючись (за нормальних умов) разом зі щільністю повітря.

## Загальні положення

**Вплив тропосфери на поширення радіохвиль проявляється таким чином:**

- викривлюються траєкторії поширення радіохвиль (рефракція);
- розсіюються радіохвилі неоднорідностями тропосфери;
- поглинається частина енергії, яка переноситься радіохвилею, у газах атмосфери;
- послаблюються радіохвилі гідрометеорами (дощ, туман, град, сніг).

## Рефракція радіохвиль

Явище рефракції обумовлено зміною діелектричної проникності та, відповідно, показника заломлення з висотою.

Абсолютні зміни значень цих величин у край незначні. Незважаючи на це, її достатньо для того, щоб траєкторія пологого променя помітно відхилилась від прямої.

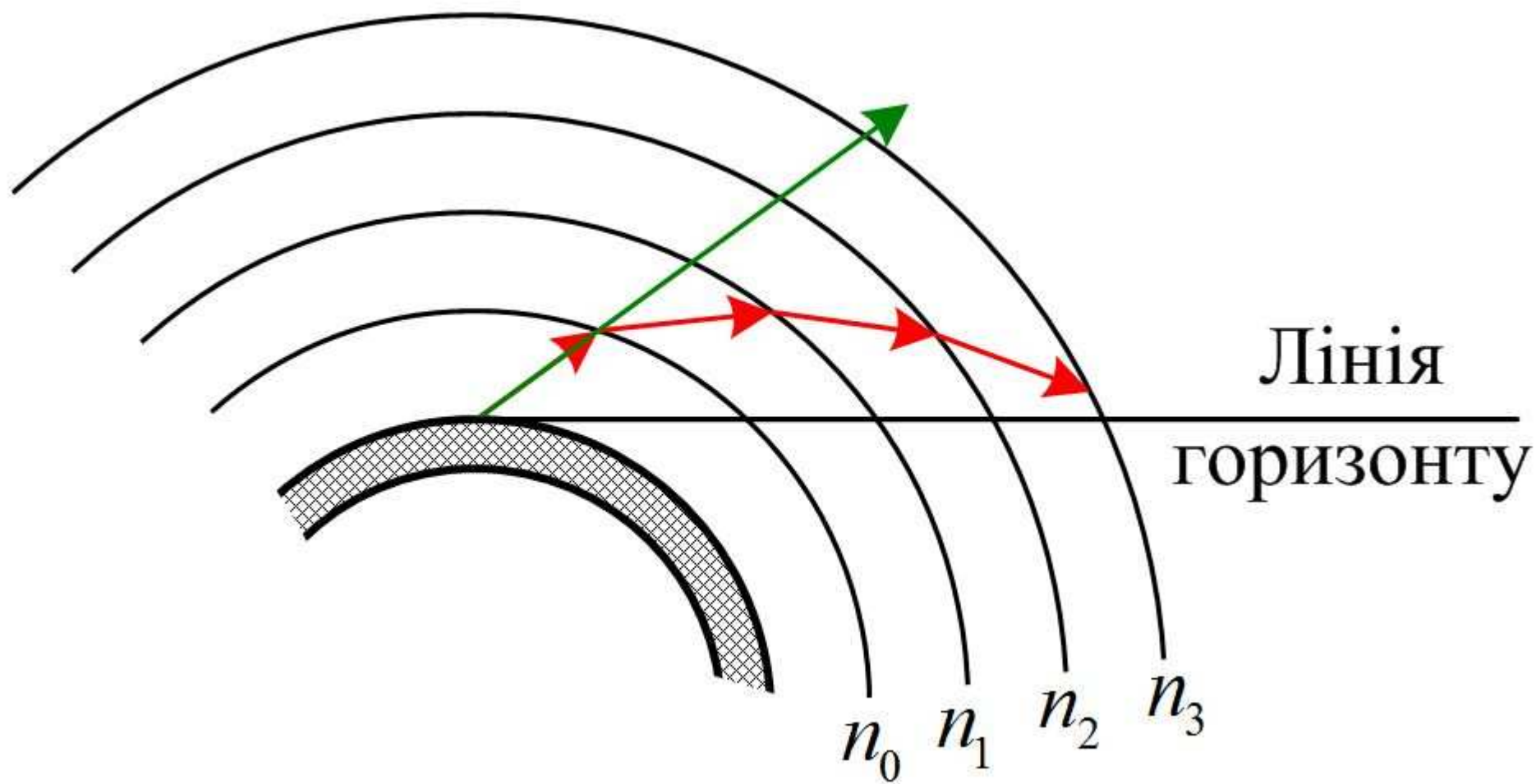
Крім цього, у реальних умовах можливі також такі стани атмосфери, коли показник заломлення збільшується з висотою.

Явище рефракції радіохвиль в атмосфері розглядають з позицій геометричної оптики (у першу чергу, на УКХ), тобто в основу кладуть закон заломлення оптичних променів.

Для визначеності, розглядатимемо проходження променя крізь тропосферу, де показник заломлення зменшується з висотою (рисунок на наступному слайді). З метою спрощення задачі тропосферу вважатимемо шарувато-неоднорідною, складеною з окремих ділянок, кожна з яких характеризуватиметься середнім показником заломлення  $n_i$ .

При проходженні променя з нижнього шару у розташований над ним наступний шар відбувається відхилення променялуца от перпендикуляра к слою, поскольку это прохождение совершается из среды, оптически более плотной, в среду, оптически менее плотную

## Рефракція радіохвиль



$$n_1 > n_2 > n_3 > \dots$$

## Рефракція радіохвиль

Таким чином, промінь, який поширюється з шару у шар, набуває поступового викривлення (відрізки червоного кольору). Внаслідок плавної зміни показника заломлення зі збільшенням висоти це злам є плавним викривленням променя, тобто траєкторія хвилі є плавна крива.

Ступінь викривлення променя характеризують радіусом кривизни:

$$R = -\frac{n}{\frac{dn}{dz} \sin \theta_0},$$

$\frac{dn}{dz}$  - градієнт показника заломлення;

$\theta_0$  - кут між напрямком випромінювання та лінією горизонту  
(початковий кут місця).

Для характеристики рефракції радіус кривизни зручно порівнювати з радіусом Землі:

$$R = mR_z.$$

## Рефракція радіохвиль

Рівняння променя та формули радіуса кривизни дозволяють зробити щодо рефракції такі **ВИСНОВКИ**:

- рефракція тим інтенсивніша, чим більше змінюється показник заломлення з висотою;
- інтенсивність рефракції тим більша, чим більший початковий кут місця  $\theta_0$ : при  $\theta_0 = 0$  рефракція найінтенсивніша, а при  $\theta_0 = 90^\circ$ , коли промінь спрямовано у зеніт, рефракція відсутня;
- при зменшенні показника заломлення з висотою  $\left(\frac{dn}{dz} < 0\right)$  промінь викривлюється донизу, до Землі,

а при збільшенні  $\left(\frac{dn}{dz} > 0\right)$  – вгору.

В однородній за висотою тропосфері  $\left(\frac{dn}{dz} = 0\right)$  рефракція відсутня.

## Рефракція радіохвиль

На практиці використовують таку класифікацію рефракції:

1) **Позитивна** ( $m > 0$  або  $\frac{dn}{dz} < 0$ ). Спостерігається за умов, коли

показник заломлення зменшується з висотою. Траєкторію радіохвилі викривлено у напрямку Землі, що призводить до її огинання радіохвилею та збільшення дальності дії радіосистем і, зокрема, дальності радіолокаційного виявлення кораблів і маловисотних ЛА.

2) **Негативна** ( $m < 0$  або  $\frac{dn}{dz} < 0$ ). Спостерігається за умов, коли показник

заломлення збільшується з висотою. Траєкторію радіохвилі викривлено від поверхні Землі і дальність прямої видимості зменшується.



## Рефракція радіохвиль

Для нормального стану атмосфери  $\frac{dn}{dz} = -4 \cdot 10^{-8} \text{ 1/м}$ , тобто рефракція

позитивна, що призводить до збільшення дальності прямої видимості. Вплив нормальної рефракції враховують уявним збільшенням радіуса Землі у 4/3 рази, що рівносильно збільшенню дальності прямої видимості до

$$R_0 [\text{км}] \cong 4,12 \left( \sqrt{h_1 [\text{м}]} + \sqrt{h_2 [\text{м}]} \right).$$

Без урахування рефракції:

$$R_0 [\text{км}] \cong 3,57 \left( \sqrt{h_1 [\text{м}]} + \sqrt{h_2 [\text{м}]} \right).$$

## Рефракція радіохвиль

Радіус кривизни траєкторії радіохвилі обернено пропорційний градієнту.

При  $\frac{dn}{dz} = -\frac{1}{R_3} = -1,57 \cdot 10^{-7} \text{ 1/м}$  радіус кривизни траєкторії

радіохвилі дорівнює радіусу Землі, і радіохвиля, спрямована горизонтально, поширюється паралельно до поверхні Землі, огинаючи її. Це **випадок критичної рефракції, при якому можливе значне збільшення дальності дії РТС.**

За аномальних атмосферних умов (різке збільшення тиску, вологості, температури) можлива і **надрефракція**, за якої радіус кривизни траєкторії радіохвилі стає меншим за радіус Землі. Тоді радіохвиля повертається до Землі, відбивається, і так багаторазово. У цьому випадку утворився **тропосферний хвилевід**. При цьому у тропосфері можливе хвилеврдне поширення радіохвиль на дуже великі відстані.

Надрефракцією також обумовлено таке явище, як оптичний міраж.

## Розсіяння та поглинання радіохвиль тропосферою

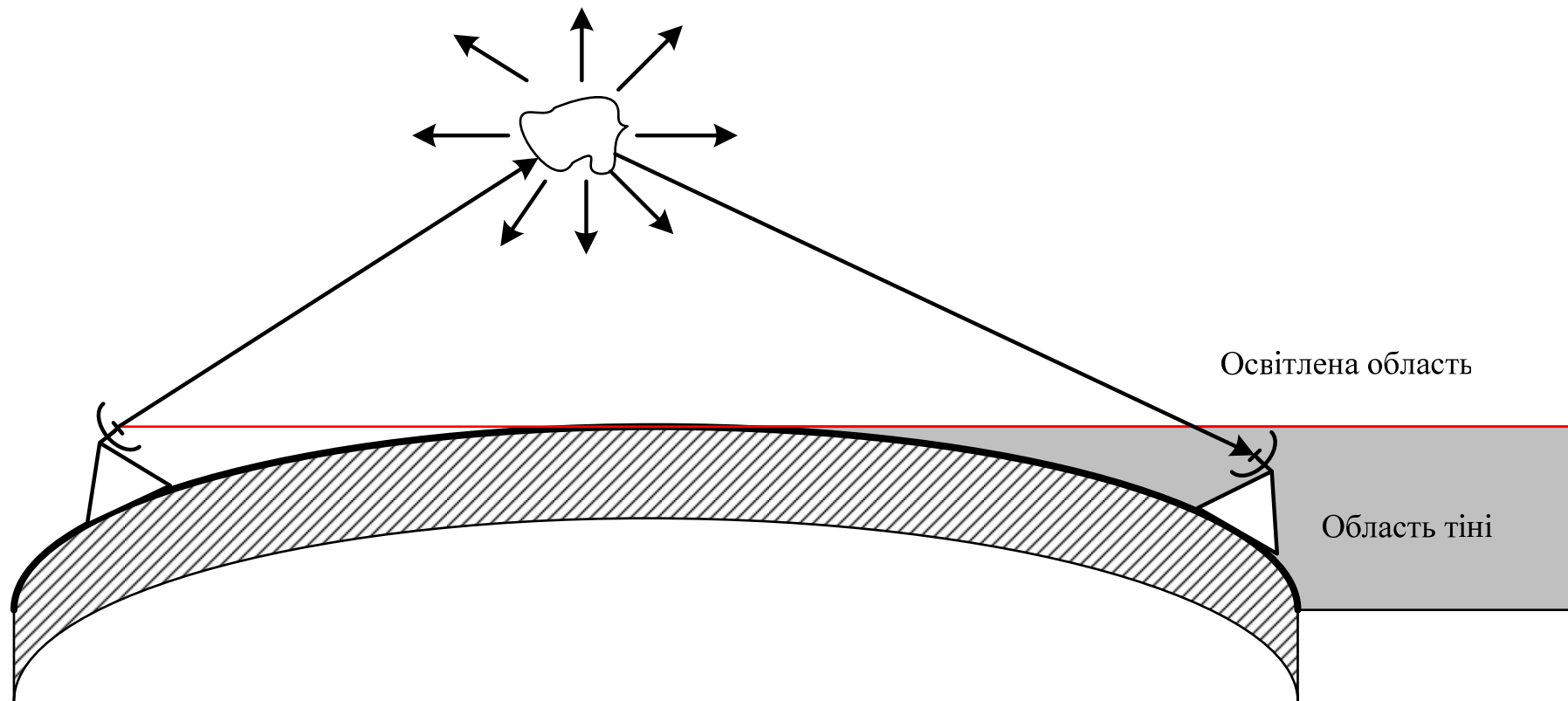
Дальнє поширення УКХ за межами радіогоризонту є нерегулярним. Більш регулярним явищем, яке сприяє підсиленню поля УКХ в області тіні, є розсіяння радіохвиль на неоднорідностях тропосфери.

Неоднорідностями у тропосфері є області з відмінними від середніх значеннями метеорологічних факторів. Тому у цих областях значення діелектричної проникності та показника заломлення відрізняються від середніх значень. Такі неоднорідності є результатом турбулентного (вихрового) руху повітря. Тому поява неоднорідностей носить пульсуючий характер. Основну роль у такому розсіянні радіохвиль відіграють дрібномасштабні неоднорідності розміром 50...60 м. Вони розташовуються між протяжними за довжиною нетовстими шаруватими неоднорідностями.

Відхилення показника заломлення у неоднорідності невелике, порядку  $10^{-6}$ .

При проходженні радіохвилі через таку неоднорідність структура останньої практично не змінюється, а частина енергії, яку переносить радіохвиля, розсіюється. Невелика частина розсіяної енергії проникає в область тіні (рисунок). Проте таких неоднорідностей багато, тому у точці поширення створюється результуюче поле за рахунок таких неоднорідностей – це принцип тропосферного радіозв'язку.

# Розсіяння та поглинання радіохвиль тропосферою



Тропосферне розсіяння радіохвиль

## Розсіяння та поглинання радіохвиль тропосферою

Послаблення радіохвиль у тропосфері обумовлено двома причинами – поглинанням радіохвиль внаслідок перетворення частини енергії, яку вони переносять, у теплову, та розсіянням радіохвиль гідрометеорами (дощ, сніг, град, хмари, туман).

Суттєве послаблення радіохвиль у тропосфері має місце лише у діапазоні сантиметрових та коротших хвиль.

Поглинання та розсіяння спричиняє зменшення щільності потоку потужності радіохвилі з відстанню за експоненціальним законом, тобто потужність сигналу на вході приймача послаблюється у  $\exp(-\alpha_{loss})$  раз. Значення множника послаблення залежить від коефіцієнта затухання  $\alpha$  та відстані, яку долають радіохвилі  $R$ . Якщо коефіцієнт затухання уздовж всієї траси постійний та розглядати випадок активної РЛС з пасивною відповіддю, то  $\alpha_{loss} = 2\alpha R$  і потужність сигналу на вході приймача зменшується за рахунок затухання від випроміненої потужності  $P_{TX}$  до

$$P_{RX} = P_{TX} \exp(-2\alpha R).$$

Якщо виразити коефіцієнт затухання у дБ/км, тоді

$$P_{RX} = P_{TX} \exp(-0,46\alpha R).$$

## Розсіяння та поглинання радіохвиль тропосферою

За наявності у атмосфері гідрометеорів та інших частинок коефіцієнт затухання є сумою парціальних коефіцієнтів затухання, спричинених поглинанням молекулами кисню та водяної пари, а також впливом твердих і рідких частинок. Молекулярне поглинання в атмосфері відбувається в основному на частотах, близьких до резонансних. Резонансні лінії всіх газів атмосфери, за винятком кисню та водяної пари, розташовані поза діапазоном радіохвиль, тому суттєво впливає на дальність дії РТС лише поглинання молекулами кисню та водяної пари. Поглинання молекулами водяної пари максимальне на довжині хвилі 1,35 см, а молекулами кисню – на довжинах хвиль 0,25 та 0,5 см. Таким чином, молекулярне поглинання значне у сантиметровому та особливо у міліметровому діапазонах, де воно обмежує дальність дії радіосистем, особливо радіолокаційних, які працюють за відбитими сигналами.

Другою причиною, яка спричиняє втрати енергії сигналу при поширенні, є розсіяння радіохвиль, перш за все краплинами дощу та туманом. **Чим більше відношення “радіус краплини/довжина хвилі”, тим більша втрата енергії за рахунок її розсіяння у всіх напрямках. Це розсіяння збільшується пропорційно до четвертого степеня частоти!**

## Розсіяння та поглинання радіохвиль тропосферою

Якщо відомий діаметр краплин та їхня кількість в одиниці об'єму, то можна визначити коефіцієнт затухання. У довідниках коефіцієнт затухання для дощу зазвичай вказують залежно від його інтенсивності (мм/год) та довжини хвилі.

У сантиметровому діапазоні коефіцієнт затухання змінюється приблизно до квадрату частоти. Наприклад, на частоті 3 ГГц при інтенсивності дощу 1 мм/год його значення 0,002 дБ/км, а на частоті 30 ГГц за тієї ж інтенсивності дощу він уже становить 0,18 дБ/км.

Послаблення радіохвиль у тумані прямо пропорційне до концентрації води у ньому. Послаблення радіохвиль, спричинене градом та снігом значно менше, ніж за дощу або туману, тому їхнім впливом зазвичай нехтують.

Наприклад, максимальну дальність дії РЛС з урахуванням затухання  $R_{\max}$  можна обчислити так:

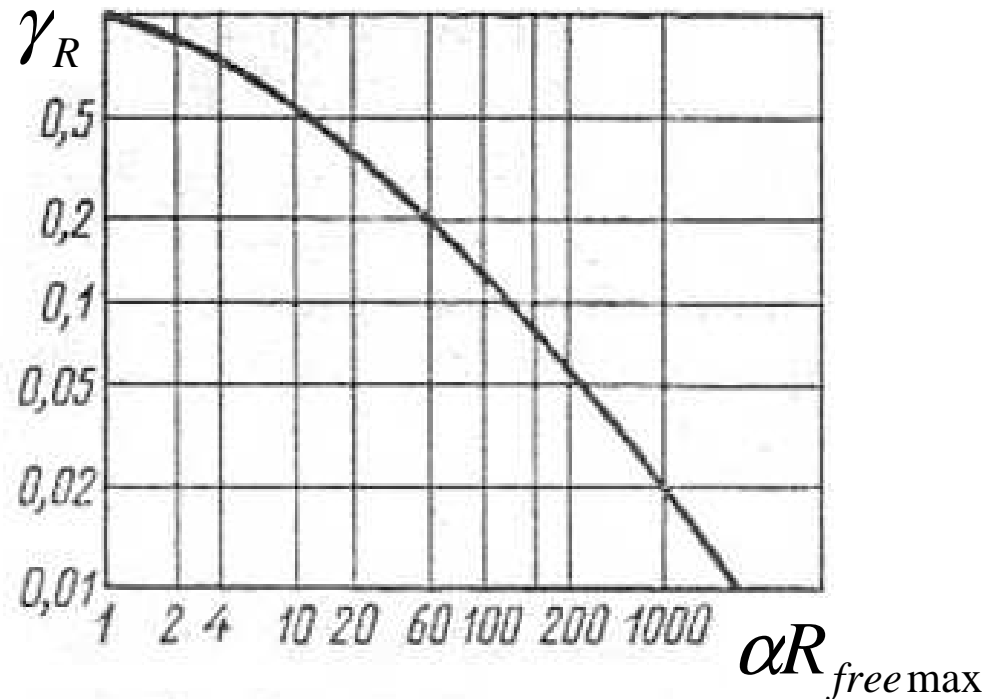
$$R_{\max} = R_{\text{freemax}} \exp(-0,5\alpha R_{\max}),$$

$R_{\text{freemax}}$  - дальність дії РЛС у вільному просторі.

## Розсіяння та поглинання радіохвиль тропосферою

Графічний розв'язок цього рівняння: при заданих коефіцієнті затухання та дальності дії у вільному просторі з графіка (рисунок) можна знайти відносне зменшення дальності

$$\gamma_R = R_{\max} / R_{\text{free max}},$$



а як результат - дальність дії РЛС з урахуванням затухання:  $R_{\max} = \gamma_R R_{\text{free max}}$ .



# **Радіохвилі в іоносфері**

## Радіохвилі в іоносфері

Нагадаємо (див. лекцію “Склад та будова атмосфери”), що починаючи з висоти приблизно 50...60 км, суттєво проявляється іонізація атмосферного середовища. Це нижня границя іоносфери. Ступінь іонізації середовища характеризують кількістю вільних електронів в одиниці об’єму  $N_e \left[ \text{ел} / \text{см}^3 \right]$ .

**Як і у тропосфері, в іоносфері можуть мати місце такі явища, як рефракція, розсіяння та поглинання радіохвиль.**

Поглинання має такі причини:

- електрони віддають частину своєї енергії (набутої у поля радіохвилі) важчим частинкам при зіткненні з ними;
- частина енергії радіохвилі витрачається у процесі гіромагнітного резонансу.

У першому наближенні можна припустити, що виконуються умови застосовності геометричної оптики (цей прийом також використовують при дослідженні рефракції у тропосфері). Це дозволяє розбити іоносферу на тонкі шарі, у межах кожного з яких діелектричну проникність вважаємо постійною. Як і для тропосфери, отримаємо викривлення траєкторії радіохвилі. При зменшенні товщини шарів, тобто при плавній зміні показника заломлення іоносфери, траєкторія хвилі за граничного переходу перетвориться у криву.

## Радіохвилі в іоносфері

При зменшенні коефіцієнта заломлення з висотою хвиля на кожен наступний шар падає під усе більшим кутом, тому на деякій висоті можуть виникнути умови для повного внутрішнього відбиття та радіохвиля піде по дотичній до границі розподілу шарів. При невеликій неоднорідності іоносфери траєкторія радіохвилі може відхилитись вниз і тоді вона, заломлюючись, повернеться до Землі – відбудуться відбиття хвилі (про це, у загальних рисах, йшла мова на лекції “Особливості поширення радіохвиль на реальних трасах”).

Таким чином, в іоносфері відбиття радіохвиль відбувається не на границі повітря-іонізований газ, а у товщі іонізованого газу. Відбиття може мати місце у тій області іоносфери, де коефіцієнт заломлення зменшується з висотою, тобто нижче максимуму електронної щільності іоносферного шару.

**Яке ж співвідношення між електронною щільністю, кутом падіння хвилі на нижню границю іоносфери та робочою частотою потрібно виконати для того, щоб мало місце відбиття радіохвиль від іоносфери – умова відбиття?**

## Радіохвилі в іоносфері

Умова відбиття:

$$\sin \theta_0 = n(z) \left( 1 + \frac{z_0}{R_3 + h_0} \right), \quad (1)$$

$\theta_0$  - кут падіння радіохвилі на нижню границю іоносфери (див рисунок);

$n(z)$  - залежність показника заломлення від висоти;

$z_0$  - висота нижньої границі іоносфери, де відбувається відбиття;

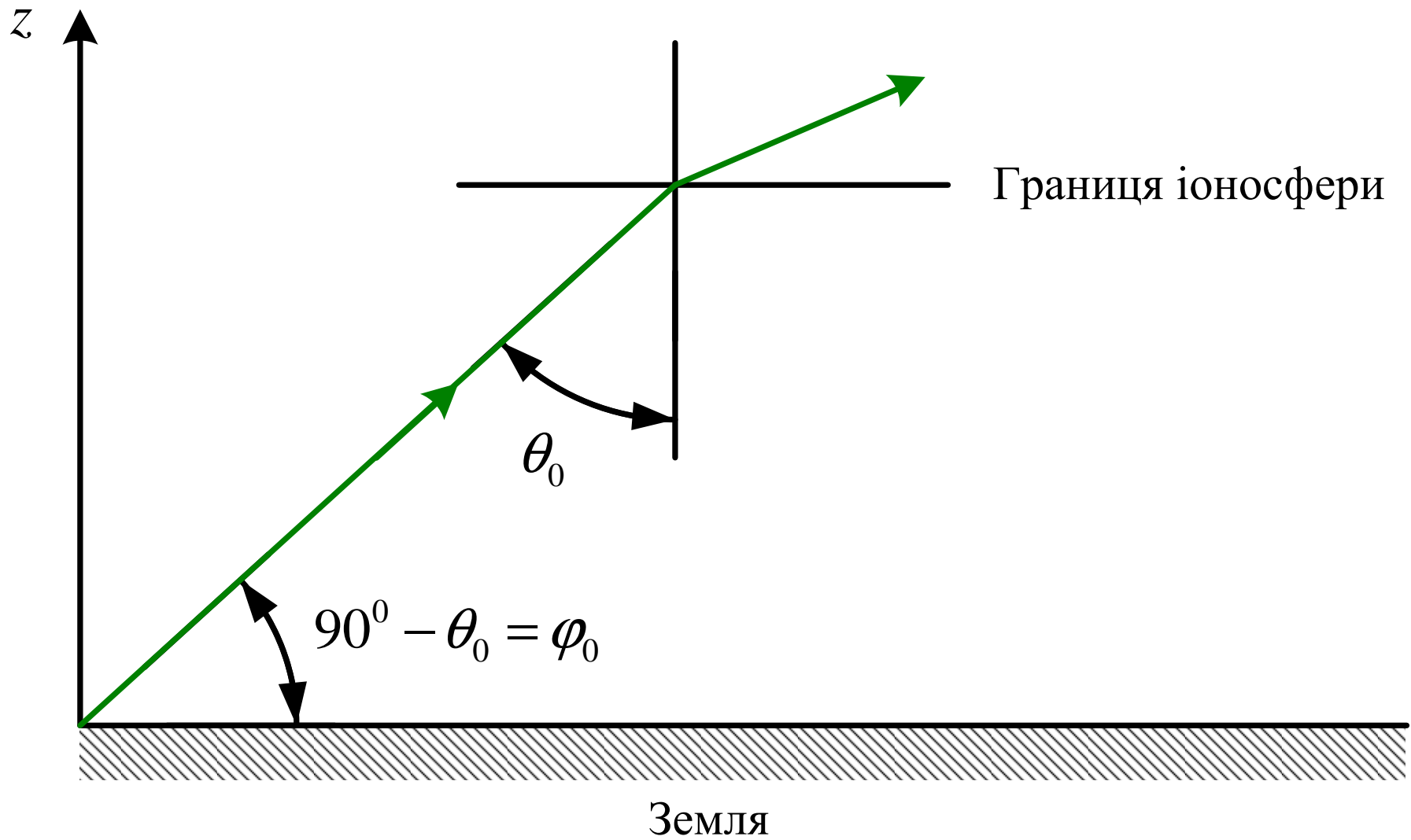
$h_0$  - висота нижньої границі іоносфери;

$R_3$  - радіус Землі.

Умову (1) можна записати по-іншому, підставивши у неї вираз для коефіцієнта заломлення іонізованого газу:

$$n(z) = \sqrt{1 - \frac{f_p^2}{f^2}} = \left[ f_p [\text{кГц}] = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{e^2 N_e}{\epsilon_0 m}} = \sqrt{81 N_e \left[ \frac{\text{ел.}}{\text{см}^3} \right]} \right] = \sqrt{1 - \frac{81 N_e}{f^2}},$$

# Радіохвилі в іоносфері



Рефракція радіохвиль в іоносфері

## Радіохвилі в іоносфері

Отримаємо:

$$\sin \theta_0 = \sqrt{1 - \frac{f_p^2}{f^2} \left[ 1 + \frac{z_0}{R_3 + h_0} \right]} \quad (2)$$

Таким чином, за певної електронної щільності хвиля даної частоти відіб'ється лише у тому випадку, якщо кут падіння  $\theta_0$  дорівнює чи більший за значення, отримане з виразу (2).

З виразу (2) можна визначити **максимальну робочу частоту радіохвилі** (у практиці радіозв'язку її називають **максимально застосовною частотою, МЗЧ**), яка відіб'ється від іоносфери за заданої електронної концентрації та куті падіння хвилі на шар:

$$f_{\max}(\theta_0) \approx \frac{9\sqrt{N_e}}{\cos \theta_0} = \left[ \frac{1}{\cos \theta_0} = \sec \theta_0 \right] = 9\sqrt{N_e} \sec \theta_0. \quad (3)$$

Співвідношення (3) ще називають "**закон секанса**".

Або через кут випромінювання радіохвилі:

$$f_{\max}(\varphi_0) = 9\sqrt{N_e} \operatorname{cosec} \varphi_0.$$

## Радіохвилі в іоносфері

Так звана **“оптимальна робоча частота” (ОРЧ) на 15...30 % менша за МЗЧ.**

З (3) випливає, **що чим менший кут падіння радіохвилі на іоносферу, тим більша електронна щільність потрібна для того, щоб хвиля відбилась, і відбиття відбувається на більшій висоті.**

Серію променевих траєкторій, які відповідають різним кутам  $\theta_0$  при фіксованій частоті показано на рисунку (слайд 24).

Якщо радіохвиля падає на іоносферу нормально, то

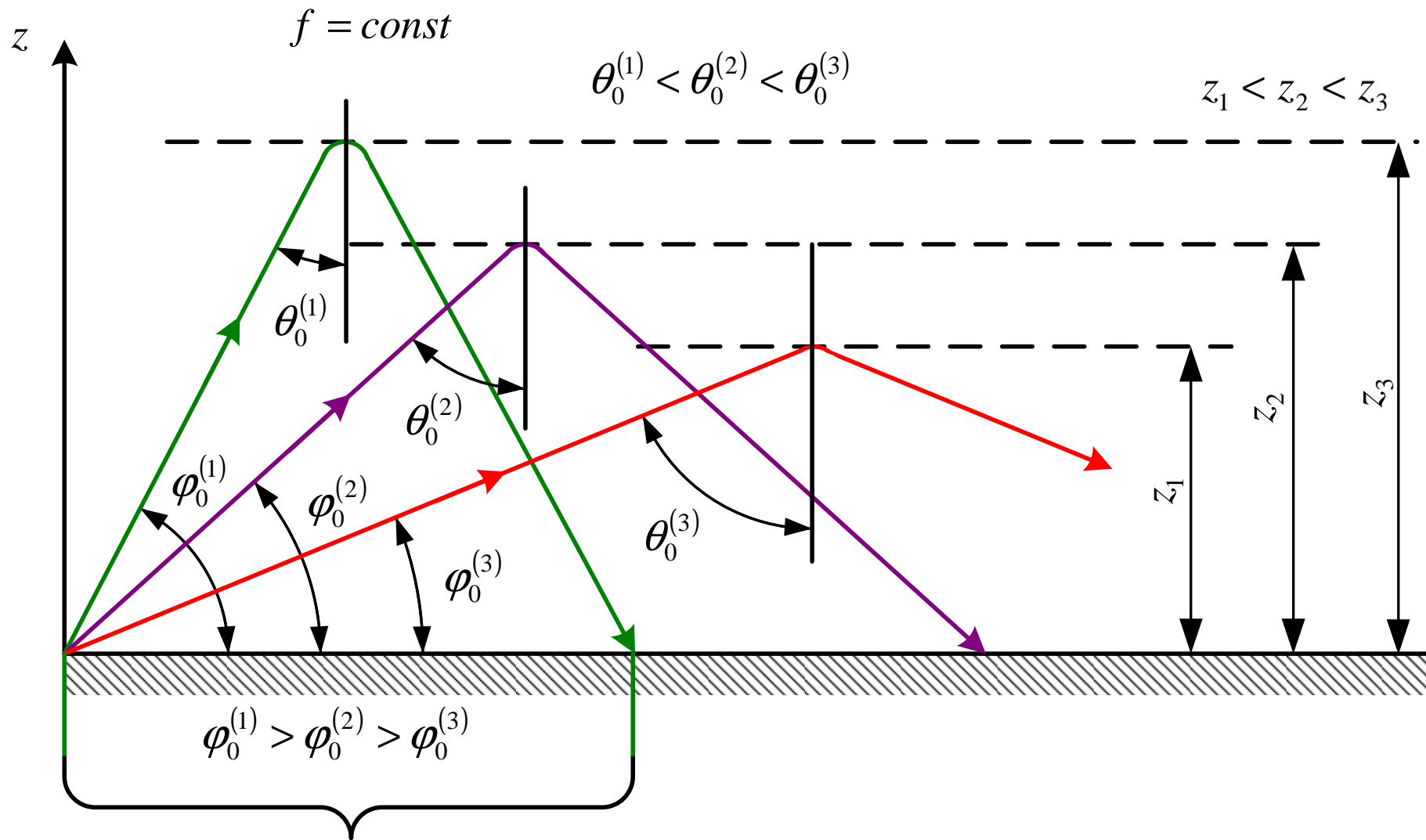
$$f_{\max}(\theta_0 = 0^0) = f_{\max}(\varphi_0 = 90^0) = f_p [\text{кГц}] = 9\sqrt{N_e}. \quad (4)$$

Це означає, що вертикально спрямований промінь відбивається на тій висоті, де частота коливань дорівнює частоті Ленгмюра (плазмовій частоті)  $f_p$ .

Зі збільшенням частоти збільшується висота, на якій відбувається відбиття – рисунок (слайд 25). Найбільшу частоту, за якої вертикально падаюча радіохвиля ще відбивається від іоносфери, називають **критичною частотою:**

$$f_{cr} [\text{кГц}] \approx 9\sqrt{N_e}. \quad (5)$$

# Радіохвилі в іоносфері



Зона мовчання

Відбиття радіохвиль в іоносфері при різних кутах падіння  
на відбивний шар іоносфери



## Радіохвилі в іоносфері



$$f_1 = f_p(N_1) \quad f_2 = f_p(N_2) \quad f_3 = f_{cr} \quad f_4 > f_{cr}$$

$$f_1 < f_2 < f_3 < f_4$$

Вплив частоти радіохвилі на висоту розташування  
відбивного шару іоносфери

## Радіохвилі в іоносфері

Таким чином, в умовах застосовності методів геометричної оптики **коефіцієнт відбиття від іоносфери змінюється залежно від частоти стрибком** при

$$f = f_{cr} :$$

$f < f_{cr}$  - якщо робоча частота  $f$  менша за критичну  $f_{cr}$ , то має місце повне відбиття радіохвилі від іоносферного шару, коефіцієнт відбиття дорівнює одиниці;

при  $f > f_{cr}$  коефіцієнт відбиття дорівнює нулю і радіохвиля поширюється у Космос.

## Радіохвилі в іоносфері

Вплив іоносфери на характеристики процесу поширення радіохвиль проявляються так:

1. Поглинання радіохвиль, спричинене тим, що іоносфера є напівпровідним середовищем, а також тим, що в іоносфері можливий гіромагнітний резонанс хвилі.

Поглинання радіохвиль в іоносфері спричиняє зменшення щільності потоку потужності у кінці радіотраси.

2. Зміна швидкості поширення сигналу та фазової швидкості хвилі. Зміна фазової швидкості хвилі від частоти (дисперсія) впливає на швидкість передачі сигналу. В іоносфері кожна зі складових спектру (гармоніка) поширюється зі своєю фазовою швидкістю. Ця обставина також призводить, наприклад, до появи похибок визначення відстані радіолокаційними методами. Дисперсія в іоносфері призводить до спотворення спектра сигналу. Наприклад, для імпульсних сигналів дисперсія призводить до розтягування (розпливання) цих імпульсних сигналів.
3. Рефракція радіохвиль в іоносфері призводить до похибок визначення кута місця (висоти) цілей, які перебувають за межами іоносфери чи у ній самій.