

УДК 621.396.96

О.Я. Луковський, К.І. Карлова, А.А. Саваткова

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## МОДЕЛЬ РОЗПОДІЛУ КОЕФІЦІЄНТА ЗАЛОМЛЕННЯ ТРОПОСФЕРИ В ПРИБЕРЕЖНИХ РАЙОНАХ

Розглядаються різні моделі розподілу коефіцієнта заломлення тропосфери. Вказується на обмеження по застосуванню деяких з них в умовах реальної метеорологічної ситуації, рельєфу і стану підстилюючої поверхні. Пропонується спосіб знаходження розподілу коефіцієнта заломлення на підставі вертикальних профілів показника заломлення, отриманих в двох точках, віддалених одна від одної.

**Ключові слова:** розподіл коефіцієнта заломлення, тропосфера.

### Вступ

Для розрахунку траєкторії розповсюдження радіохвиль використовують різні методи [1, 4 – 7]. Серед них одним з найбільш вживаних на практиці є метод геометричної оптики. В цьому випадку траєкторія розповсюдження електромагнітної хвилі визначається головним чином просторовим розподілом значення діелектричної проникності  $\epsilon$  середовища, через яке проходить радіохвиля. На практиці користуються не величиною  $\epsilon$ , а коефіцієнтом заломлення  $n = \sqrt{\epsilon}$  або показником заломлення  $N = (n - 1) \cdot 10^6$ , який змінюється в  $N$  - одиницях.

Вивченню характеру поведінки коефіцієнта заломлення  $n$  і показника заломлення  $N$  у тропосфері присвячено значне число робіт [1, 4 – 7]. Проте у відомій літературі мало уваги приділяється модельному опису  $n$  і  $N$  у прибережних районах. Заповнити цей пропуск і є **метою даної статті**.

### Основна частина

Як відомо в межах тропосфери залежність показника заломлення від метеорологічних параметрів виражаються формулою:

$$N = \frac{77,6}{T} \cdot \left( p + \frac{4810e}{T} \right), \quad (1)$$

де  $T$  – температура повітря;  $p$  – атмосферний тиск;  $e$  – тиск водяної пари.

Співвідношення (1) з достатньою для практики радіолокації точністю описує зміну показника заломлення  $N(\vec{r}, t)$  по простору ( $\vec{r}$ ) і часу ( $t$ ) над сушею, оскільки вхідні в співвідношення (1) метеорологічні параметри мають яскраво виражену залежність  $T(\vec{r}, t)$ ,  $p(\vec{r}, t)$ ,  $e(\vec{r}, t)$  від простору ( $\vec{r}$ ) і часу ( $t$ ). Разом з тим ця модель не достатньо прийнята для практики, результати при розгляді характеру поведінки показника заломлення в прибережних районах і особливо на межі суша-море.

Підхід до розгляду модельного представлення показника заломлення поблизу межі суша-море викладений в [3]. Проте в [3] завдання розрахунку показника заломлення не було доведено до конкретних результатів.

Аналітична модель просторового розподілу показника заломлення  $N(\vec{r})$  за наявності межі суша-море в приграничному шарі атмосфери до висоти 1 км. можливо визначити на підставі рішення рівняння турбулентної дифузії для потенційного модуля ( $n$ ) показника заломлення:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial t} + (\bar{u} \cdot \nabla \Pi) = \text{div}(k \cdot \nabla \Pi), \quad (2)$$

де  $t$  – час;  $\bar{u}$  – швидкість вітру;  $k$  – коефіцієнт турбулентної дифузії.

Використовуючи методику, викладену в [4] рішення рівняння (2) можна отримати в наступному вигляді:

$$N(x, z) = \Pi(x, z) + gN \cdot z; \quad \Pi(x, z) = N_s(x) + \Phi(x, z);$$

$$N_s(x) = \begin{cases} N_0, & \text{при } x < 0; \\ N_0 + \Delta N, & \text{при } x > 0; \end{cases} \quad (3)$$

$$\Phi(x, z) = -\Delta N \sum_{v=0}^{\infty} \frac{2}{\pi \left( v + \frac{1}{2} \right)} \times \\ \times \exp \left\{ -\frac{x}{H} \cdot \frac{k}{u \cdot H} \cdot \pi^2 \left( v + \frac{1}{2} \right)^2 \right\} \sin \left[ \frac{z}{H} \cdot \pi \left( v + \frac{1}{2} \right) \right],$$

де  $z$  – вертикальна координата;  $x$  – горизонтальна координата відлічувана від межі суша-море;  $\Delta N$  – перепад показника заломлення на межі суша-море;  $H$  – гранична висота  $H = 1000$  м;  $N_0$  – початкове значення коефіцієнта заломлення над сушею у поверхні землі;  $g_N = -0,04 \text{ м}^{-1}$  – вертикальний градієнт  $N$  для стандартної тропосфери.

Результати моделювання на ЕОМ розподілу показника заломлення тропосфери в прикордонному шарі з використанням вищевказаних формул пока-

зує задовільний збіг даних, отриманих за допомогою розрахунків, і даних, отриманих експериментальним шляхом [4].

Для прикладу на рис. 1 приведені графіки, що показують трансформацію вертикального профілю коефіцієнта заломлення при переході з суші на море. Видно, що криві  $N(x, z)$  при побудові яких були враховані горизонтальні градієнти  $\partial N / \partial x$  при переході з поверхні суші на морі не зазнають стрибка.

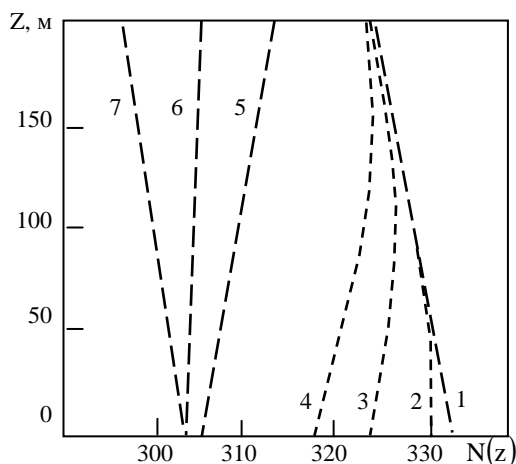


Рис. 1. Висотні профілі показника заломлення поблизу межі суша-море при вітрі, що дме з моря на сушу: 1 – над морем; 2-7 – над сушею на різних відстанях від берегової смуги (2 – 100 м, 3 – 500 м, 4 – 1000 м, 5 – 5000 м, 6 – 20 км, 7 – 300 км)

Знаходження розподілу  $N(x, z)$  за експериментальними даними. Вище запропоновані моделі можна назвати точковими, оскільки просторовий розподіл коефіцієнта заломлення знаходиться на підставі достатньо грубих припущень про будову тропосфери і вимірювання деяких її параметрів лише в одній точці. Якщо ж використовувати відомості  $N$  або  $n$  які отримані з рознесених джерел (наприклад, одна метеостанція знаходиться на побережжі, інша – на кораблі), то структуру показника заломлення можна знайти наступним способом.

Хай нам відома залежність  $N$  від висоти в точках  $X_1$  і  $X_2$ , віддалених одна від одної на відстань  $D$ . Хай  $N$  в точці  $X_1$  залежить від висоти як якась функція  $N_1(z)$ , а в точці  $X_2$  – як  $N_2(z)$ . Припустимо, що на відстані  $D = X_2 - X_1$  функція  $N_1(z)$  плавно переходить в  $N_2(z)$ . Тоді значення коефіцієнта заломлення тропосфери між точками  $X_1$  і  $X_2$  можна знайти за формулою:

$$N(x, z) = N_1(z) + \frac{N_2(z) - N_1(z)}{D} \cdot (x - X_1), \quad (4)$$

$$X_1 \leq x \leq X_2.$$

На рис. 2 приведено приклад переходу від лінійної функції  $N_1(z)$  до  $N_2(z)$ , отриманої при обробці даних експерименту, на інтервалі  $D = 1000$  м.

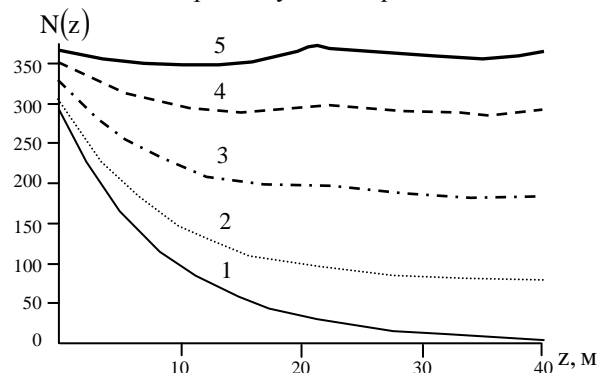


Рис. 2. Зміна вертикального профілю коефіцієнта заломлення: 1 – початковий профіль; 2-4 – на різних відстанях від початкової точки (2 – 300 м, 3 – 500 м, 4 – 800 м); 5 – профіль  $N(z)$ , отриманий при обробці експериментальних даних

Дана модель дозволяє перейти від дискретної просторової структури показника заломлення тропосфери до шматково-безперервної.

На практиці, при виборі моделі для розрахунків виходять з цілей дослідження, припущень про структуру тропосфери і наявності початкових даних.

## Висновки

За наявності межі суша-море облік горизонтальних градієнтів дозволяє створювати точніші аналітичні моделі розподілу коефіцієнта заломлення. За відсутності таких моделей розподіл коефіцієнта заломлення можливо знайти на основі сукупності його вертикальних профілів, отриманих в крапках, рознесених по дальності.

## Список літератури

1. Кравцов Ю.А. Прохождение радиоволн через атмосферу Земли / Ю.А. Кравцов. – М.: Радио и связь, 1983. – 340 с.
2. Бин Б.Р. Радиометеорология: пер. с англ. / Б.Р. Бин, Е.Дж. Даттон; под ред. А.А. Семенова. – Л.: Гидрометеоиздат, 1971. – 368 с.
3. Андрианов В.В. Пространственная структура показателя преломления вблизи границы суша-море / В.В. Андрианов, Б.В. Ракитин // Радиотехника и электроника. – 1980. – № 8. – С. 1624-1628.
4. Долуханов М.П. Распространение радиоволн / М.П. Долуханов. – М.: Сов. радио, 1972. – 360 с.
5. Веденский Б.А. Распространение УКВ радиоволн / Б.А. Веденский. – М.: Наука, 1973. – 420 с.
6. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн / Ф.Б. Черный. – М.: Сов. радио, 1972. – 380 с.
7. Кравцов Ю.А. Геометрическая оптика неоднородных сред / Ю.А. Кравцов, Ю.И. Орлов. – М.: Наука, 1980. – 390 с.

Надійшла до редколегії 5.05.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Д. Карлов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

**МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕЛОМЛЕНИЯ ТРОПОСФЕРЫ В ПРИБРЕЖНЫХ РАЙОНАХ**

О.Я. Луковский, К.И. Карлова, А.А. Саваткова

*Рассматриваются различные модели распределения коэффициента преломления тропосферы. Указывается на ограничения по применению некоторых из них в условиях реальной метеорологической ситуации, рельефа и состояния подстилающей поверхности. Предлагается способ нахождения распределения коэффициента преломления на основании вертикальных профилей показания преломления, полученных в двух точках, удаленных друг от друга.*

**Ключевые слова:** *распределение коэффициента преломления, тропосфера.*

**A MODEL OF DISTRIBUTING COEFFICIENT IS REFRACTION OF TROPOSPHERE IN OFF-SHORE DISTRICTS**

O.Ya. Lukovskiy, K.I. Karlova, A.A. Savatkova

*The different models of distributing of coefficient of refraction of troposphere are examined. Specified on limitation on application some from them in the conditions of the real meteorological situation, relief and state of laying surfaces. The method of finding of distributing of coefficient of refraction is offered on the basis of vertical types of index of refraction, got in two points, remote one from one.*

**Keywords:** *distributing of coefficient of refraction, troposphere.*