

МОДЕЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕЛОМЛЕНИЯ НИЖНЕГО СЛОЯ ТРОПО- СФЕРЫ ВБЛИЗИ МОРСКОЙ БЕРЕГОВОЙ ЧЕРТЫ

к.т.н. Д.В. Карлов, В.Л. Мисайлов, Н.Н. Петрушенко, О.О. Окунев,
О.Я. Луковский, П.В. Титков
(представил д.т.н., проф. А.В. Полярус)

Рассматриваются различные методы расчета пространственного распределения коэффициента преломления нижнего слоя тропосферы. Указывается на ограничения по применению некоторых из них в условиях реальной синоптической ситуации, рельефа и состояния подстилающей поверхности. Предлагается способ нахождения пространственного распределения коэффициента преломления на основании вертикальных профилей показателя преломления, полученных в двух точках, удаленных друг от друга на некоторое расстояние.

Постановка проблемы. Для нахождения пути распространения радиоволн используют различные методы [2, 5 – 9]. Среди них одним из наиболее простых является метод геометрической оптики. В этом случае траектория распространения электромагнитной волны определяется главным образом пространственным распределением значения диэлектрической проницаемости ϵ среды, через которую проходит волна. На практике пользуются не величиной ϵ , а коэффициентом преломления $n = \sqrt{\epsilon}$ или показателем преломления $N = (n - 1) \cdot 10^6$, который измеряется в N-единицах.

Как известно [1] зависимость показателя преломления воздуха от метеорологических параметров выражается формулой [1]

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

где T – температура воздуха, К; p – атмосферное давление, мб; e – давление водяных паров, мб.

Так как значения "T", "p" и "e" для каждой точки пространства априорно неизвестны, то для нахождения высотного профиля диэлектрической проницаемости атмосферы используют различные модели.

Анализ литературы. Наиболее распространенной моделью, ис-

пользуемой при аналитическом описании распространения электромагнитных волн в тропосфере, является экспоненциальная модель [2]

$$\varepsilon(z) = 1 + \nu_0 e^{-\beta z}, \quad (2)$$

где ν_0 – значение поправки диэлектрической проницаемости у земной поверхности, β – скорость убывания $\varepsilon(z)$ с высотой.

Другая модель основана на разделении коэффициента преломления на сухую и влажную составляющие и предположении, что каждая из них меняется с высотой по экспоненциальному закону

$$\varepsilon(z) = \left[\frac{(N_c \exp(-z/H_c) + N_b \exp(-z/H_b))}{10^6} + 1 \right]^2, \quad (3)$$

где N_c и N_b – значения сухой и влажной составляющей на уровне земной поверхности, а H_c и H_b – масштабы их изменения по высоте.

Для описания электрических свойств нейтральной атмосферы применяется также биэкспоненциальная модель

$$\varepsilon(z) = 1 + \exp[-A(B+z)], \quad (4)$$

где параметры A и B выбираются по-разному для двух областей: $z \leq 10$ км и $z > 10$ км. На рис. 1 приведены графики зависимости ε от высоты, найденные по формулам (2) – (4).

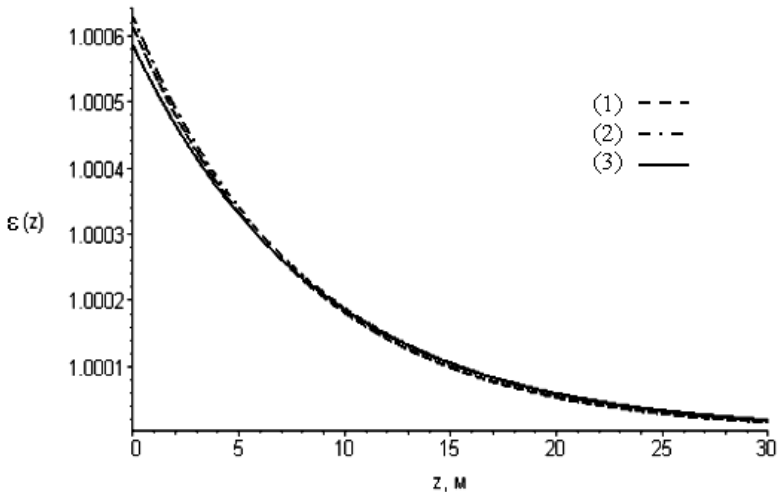


Рис. 1. Зависимость значения диэлектрической проницаемости воздуха от высоты

Как видно из рисунка, кривые $\varepsilon(z)$ идут очень близко, и выбор конкретной модели зависит от того, насколько близки расчетные значения ε

к полученным в ходе эксперимента.

В стандартных условиях формулы (2) – (4) достаточно хорошо отражают зависимость ε от z , но метеопараметры атмосферы, а в особенности нижнего слоя тропосферы, не являются постоянными величинами и могут сильно меняться как в вертикальном направлении, так и в горизонтальном.

В стандартных условиях высотный градиент составляет $\partial N / \partial z = 4$ N-ед на 100м, что гораздо больше, чем в горизонтальном $\partial N / \partial x = 0,01 \div 0,5$ N-ед на 100 м. Однако при определенных условиях горизонтальные градиенты могут достигать 2 N-ед на 100 м [3]. Если подстилающая поверхность имеет резко выраженные неоднородности, например, раздел суша-море, то вычисление $\varepsilon(z)$ по формулам, принятым для стандартной атмосферы, приводит к результатам, сильно отличающимся от полученных экспериментально.

Цель статьи. Рассмотрим возможные пути нахождения пространственного распределения коэффициента преломления при реальной синоптической ситуации.

Аналитическая модель пространственного распределения коэффициента преломления при наличии границы суша-море. В таких условиях определение пространственно-временного распределения $N(\vec{r}, t)$ в пограничном слое атмосферы до высоты 1 км возможно на основании решения уравнения турбулентной диффузии для потенциально-го модуля показателя преломления

$$\frac{\partial \Pi}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla \Pi) = \text{div}(k \cdot \nabla \Pi), \quad (5)$$

где t – время, \vec{u} – скорость ветра, k – коэффициент турбулентной диффузии.

На основании методики, изложенной в [4], получаем следующие выражения

$$\begin{aligned} N(x, z) &= \Pi(x, z) + g_N \cdot z; \\ \Pi(x, z) &= N_s(x) + \Phi(x, z); \\ N_s(x) &= \begin{cases} N_0, & \text{при } x < 0; \\ N_0 + \Delta N, & \text{при } x > 0; \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

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

где z – вертикальная координата; x – горизонтальная координата; ΔN – скачек показателя преломления на границе суша-море; H – граничная высота, 1000 м; N_0 – начальное значение коэффициента преломления над сушей у поверхности земли; $g_N = -0,04 \text{ м}^{-1}$ – вертикальный градиент N

для стандартной радиоатмосферы.

Следует заметить, что в вышеизложенной модели считается, что N при переходе через границу суша-море скачком изменяется на ΔN , чего в реальных условиях не происходит. Поэтому предлагается в функцию $N_s(x)$ ввести переменную η , которая учитывала бы горизонтальный градиент $\partial N/\partial x$ и его зависимость от типа и состояния подстилающей поверхности.

С учетом вышеизложенного получаем, что

$$N_\eta(x) = \begin{cases} N_0, & \text{при } x < 0; \\ N_0 + \Delta N [1 - \exp(-\eta)], & \text{при } x > 0. \end{cases} \quad (7)$$

Результаты моделирования пространственного распределения показателя преломления тропосферы в пограничном слое на ЭВМ с использованием вышеприведенных формул показывает удовлетворительное совпадение данных, полученных с помощью расчетов, и данных, полученных экспериментальным путем [4].

На рис. 2 приведены графики, показывающие трансформацию вертикального профиля коэффициента преломления при переходе с суши на море. Видно, что кривые $N_\eta(x, z)$, при построении которых были учтены горизонтальные градиенты $\partial N/\partial x$, при переходе с поверхности суши на море не претерпевают скачка.

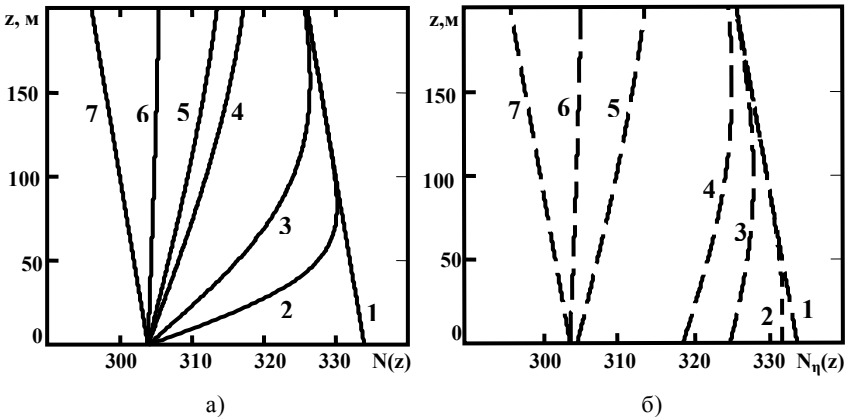


Рис. 2. Высотные профили показателя преломления вблизи границы суша-море при ветре, дующем с моря на сушу: 1 – над морем; 2 – 7 – над сушей на различных расстояниях от береговой линии (2 – 100 м, 3 – 500 м, 4 – 1000 м, 5 – 5000 м, 6 – 20 км, 7 – 300 км)

Нахождение распределения $N(x, z)$ по экспериментальным данным. Вышеперечисленные модели можно назвать «точечными», так как пространственное распределение коэффициента преломления находится

на основании довольно грубых предположений о строении тропосферы и измерении (или выборе) некоторых ее параметров лишь в одной точке. Если же использовать сведения о N или n , полученные из разнесенных источников (например, одна метеостанция находится на побережье, другая – на корабле), то пространственную структуру показателя преломления можно найти следующим способом.

Пусть нам известна зависимость N от высоты в точках X_1 и X_2 , удаленных друг от друга на расстояние D . Пусть N в точке X_1 зависит от высоты как некая функция $N_1(z)$, а в точке X_2 – как $N_2(z)$. Предположим, что на расстоянии $D = X_2 - X_1$ функция $N_1(z)$ плавно переходит в $N_2(z)$. Тогда значения коэффициента преломления тропосферы между точками X_1 и X_2 можно найти по формуле

$$N(x, z) = N_1(z) + \frac{N_2(z) - N_1(z)}{D} \cdot (x - X_1), \quad X_1 \leq x \leq X_2. \quad (8)$$

На рис. 3 приведен пример перехода от линейной функции $N_1(z)$, заданной формулой (3), к $N_2(z)$, полученной при обработке данных эксперимента, на интервале $D = 1000$ м.

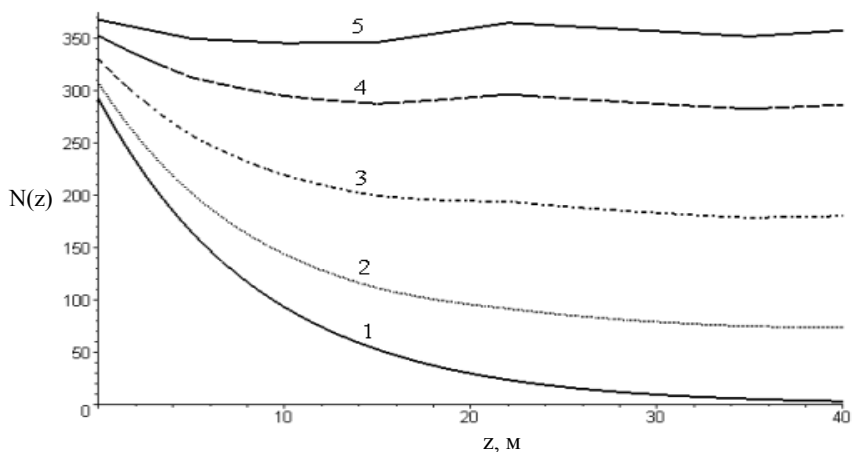


Рис. 3. Изменение вертикального профиля коэффициента преломления: 1 – начальный профиль, заданный формулой (3); 2 – 4 – на различных расстояниях от исходной точки (2 – 300 м, 3 – 500 м, 4 – 800 м); 5 – профиль $N(z)$, полученный при обработке экспериментальных данных

Данная модель позволяет перейти от дискретной пространственной структуры показателя преломления тропосферы к кусочно-непрерывной.

На практике, при выборе модели для расчетов исходят из целей исследования, предположений о структуре тропосферы и наличия исход-

ных данных.

Выводы. 1. При наличии границы суша-море учет горизонтальных градиентов позволяет создавать более точные аналитические модели распределения коэффициента преломления.

2. При отсутствии таких моделей пространственное распределение коэффициента преломления возможно найти на основе совокупности его вертикальных профилей, полученных в точках, разнесенных по дальности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бин Б.Р., Даттон Е.Дж. Радиометеорология: Пер. с англ. / Под ред. А.А. Семенова. – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – 368 с.
2. Кравцов Ю.А. Прохождение радиоволн через атмосферу Земли. – М.: Радио и связь, 1983.
3. Казаков Л.Я., Ломакин А.Н. Неоднородности коэффициента преломления воздуха в тропосфере. – М.: Наука, 1976. – 165 с.
4. Андрианов В.В., Ракитин Б.В. Пространственная структура показателя преломления вблизи границы суша-море // Радиотехника и электроника. – 1980. – № 8. – С. 1624 – 1628.
5. Распространение ультракоротких радиоволн / Под ред. Б.А. Шиллерова. – М.: Сов. радио, 1954. – 564 с.
6. Долуханов М.П. Распространение радиоволн. – М.: Сов. радио, 1972.
7. Введенский Б.А. Распространение УКВ радиоволн. – М.: Наука, 1973.
8. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн. – М.: Сов. радио, 1972.
9. Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. – М.: Наука. – 1980.

Поступила 4.04.2004

КАРЛОВ Дмитрий Владимирович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник ВНЦ КД. В 1995 году окончил ХВУ. Область научных интересов – радиолокация и радионавигация.

МИСАЙЛОВ Виталий Леонидович, адъюнкт очной адъюнктуры при ХВУ. В 2000 году окончил ХВУ. Область научных интересов – радиолокация и радионавигация.

ПЕТРУШЕНКО Николай Николаевич, военнослужащий. В 2002 году окончил НАОУ. Область научных интересов – радиотехника.

ОКУНЕВ Олег Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры ХВУ. В 1992 году окончил ВИРТА. Область научных интересов – радиолокация и радионавигация.

ЛУКОВСКИЙ Олег Ярославович, адъюнкт ХВУ. В 1999 году окончил ХВУ. Область научных интересов – радиолокация и радионавигация.

ТИТКОВ Павел Владимирович, военнослужащий. В 2002 году окончил ХВУ. Область научных интересов – радиолокация и радионавигация.