

А.А. Журавлев, О.Г. Хуторова

## Рефракция электромагнитных волн в реальной турбулентной атмосфере с загрязнениями

Казанский государственный университет

Поступила в редакцию 9.02.2000 г.

На основе трехмерных спектральных функций флуктуаций градиента концентрации пассивной консервативной примеси в турбулентной атмосфере исследованы рефракционные явления и построена модель. Получены спектры градиента коэффициента преломления и флуктуаций угла рефракции для всего диапазона масштабов неоднородностей. Определены величины дисперсии угла прихода радиоволны для различных уровней загрязненности воздуха. По экспериментальным данным найдены величины горизонтального и вертикального градиентов концентрации химических примесей в тропосфере. Модельные расчеты проведены для следующих веществ:  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_2$ . Проанализировано влияние водяного пара, что позволило приблизить модель к реальным условиям. Сравнение с рядом экспериментальных работ показало высокую степень соответствия модели реально наблюдаемой картине.

### Введение

Вопрос о рассеянии волн атмосферной турбулентностью давно привлек к себе внимание исследователей в связи с наблюдаемым явлением дальнего распространения КВ- и УКВ-волн. Многими авторами были детально исследованы вопросы образования и эволюции турбулентности, ее влияние на радиосвязь. Обычно они рассматривали неоднородности температуры, давления, скорости ветра или концентрации вещества. Но также есть возможность оценить влияние неоднородностей градиента того или иного параметра атмосферы, так как, например, угол рефракции электромагнитной волны непосредственно зависит от градиента коэффициента преломления воздуха.

В работе [1] Обухов предложил исследовать турбулентность с помощью аппарата структурных и спектральных функций. Позже этот метод получил широкое распространение. Так, в монографии [2] были получены структурные и спектральные функции полей скорости ветра, температуры и концентрации пассивной консервативной примеси. Вид спектральных функций определяется параметрами атмосферы, действующими силами, перераспределением турбулентной энергии и выводится с помощью методов теории размерности. Более поздние работы [3, 4] успешно использовали аппарат структурных и спектральных функций для описания неоднородностей концентрации свободных электронов в ионосфере.

Работа [5] рассматривает турбулентность в ионосфере, где в качестве параметра неоднородности фигурирует градиент электронной концентрации. В данной статье для построения спектра градиента концентрации примеси в тропосфере воспользуемся спектральными функциями градиента электронной концентрации, представленными в [5]. Пассивной консервативной примесью будем считать молекулы химических веществ, присутствующих в воздухе.

### Спектральные функции градиента концентрации пассивной консервативной примеси

Для каждой области масштабов турбулентных неоднородностей вид спектра определяется различными причинами. Мелкомасштабные турбулентные флуктуации выражаются через меру неоднородности концентрации примеси  $g_N$ , коэффициент молекулярной диффузии  $D_m$  и волновое число  $p$  [5]:

$$E(p) = c_0 \frac{g_N}{D_m} p^{-1}, \quad (1)$$

где  $c_0$  – константа;  $g_N$  – мера неоднородности концентрации примеси, возникающая в единицу времени за счет турбулентности:

$$g_N = K \left( \frac{d\bar{N}}{dz} \right)^2, \quad (2)$$

где  $K$  – коэффициент турбулентного обмена;  $\frac{d\bar{N}}{dz}$  – усредненный вертикальный градиент концентрации примеси.

В изотропной подобласти инерционного интервала спектр определяется выражением [5]:

$$E(p) = c_1 \frac{g_N}{\varepsilon^{1/3}} p^{1/3}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon$  – удельная энергия диссипации.

В архимедовой подобласти инерционного интервала процессы определяются действием архимедовых сил и спектр представлен в виде [5]:

$$E(p) = c_2 \frac{g_N}{M^{1/5} \beta^{2/5}} p^{3/5}, \quad (4)$$

где  $M$  – скорость выравнивания температурных неоднородностей;  $\beta$  – архимедов параметр.

Для области крупномасштабной квазидвумерной турбулентности приводится следующее выражение [5]:

$$E(p) = c_3 \frac{g_N}{\varepsilon_3^{1/3}} p, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_3$  – скорость спектрального переноса энтрофии.

### Влияние химических примесей

Согласно молекулярной теории вещества диэлектрическая проницаемость газа зависит от абсолютной температуры  $T_a$ , давления  $p_a$  и концентрации полярных молекул  $N$ . На распространение радиоволн УКВ- и СВЧ-диапазонов (вплоть до  $\lambda = 1$  мм) заметное влияние оказывают полярные химические примеси [6]. В общем случае коэффициент преломления воздуха представляется выражением [6]:

$$(n-1) \cdot 10^6 = \frac{a_1 p_0}{T_0} + \frac{a_2 e}{T_0} + \frac{a_3 e}{T_0^2}. \quad (6)$$

Здесь первое слагаемое определяет влияние неполярных молекул газовой смеси, а второе и третье – полярных. Коэффициенты из данного выражения равны [7]:  $a_1 = 77,6$ ,  $a_2 = 12,96$ ,  $a_3 = 3,72 \cdot 10^3$  град/мбар.

Поскольку при атмосферных условиях  $a_2 \ll a_3/T_0$ , то вторым слагаемым пренебрегаем [6]. С учетом формулы Максвелла ( $n = \sqrt{\varepsilon_\mu}$ , где  $\mu = 1$ ), производя замену:

$$e = \frac{M_a}{M_s} p_0 q, \quad (7)$$

где  $M_a$  – средний молекулярный вес воздуха ( $M_a = 29$ );  $M_s$  – молекулярный вес химической примеси;  $q$  – относительная концентрация  $\left( q = \frac{m_{\text{sub}}}{m_{\text{air}}} \right)$ , и учитывая

$A = a_1 \cdot 10^{-6} = 1,552 \cdot 10^{-4}$ ,  $B = a_3 \cdot 10^{-6} = 0,746$ , получаем выражение для коэффициента преломления смеси газов в виде [7]:

$$n = \frac{p_0}{T_a} \left( A + \frac{B}{T_a} \frac{M_a}{M_s} \frac{m_{\text{sub}}}{m_{\text{air}}} \right) + 1 \quad (8)$$

и соответственно для градиента коэффициента преломления:

$$\frac{dn}{dz} = \frac{B p_0}{T_a^2} \frac{M_a}{M_s} \frac{1}{m_{\text{air}}} \frac{dm_{\text{sub}}}{dz}. \quad (9)$$

Было выявлено, что молекулы подавляющего большинства химических веществ имеют постоянный магнитный момент [8], что обуславливает пригодность вышеизложенной теории для расчетов параметров радиотрасс в загрязненном воздухе.

Согласно теории случайных полей для локально изотропного поля существует связь между спектральной и структурной функциями в виде [2]:

$$E(\eta) = \frac{1}{4\pi^2 \eta^2} \int_0^\infty \frac{\sin \eta r}{\eta r} \frac{d}{dr} [r^2 D'(r)] dr. \quad (10)$$

По определению структурной функции ее можно записать в виде

$$D_\xi(r) = \langle [\xi(\bar{r}_1 + r) - \xi(r_1)]^2 \rangle \quad (11)$$

После подстановки выражения (9) и преобразований для структурной функции градиента коэффициента преломления получаем

$$D_{\nabla n}(r) = \left[ \frac{B p_a}{T_a^2} \frac{M_a}{M_s} \frac{\langle [m_{\text{sub}}(\bar{r}_1 - \bar{r}) - m_{\text{sub}}(\bar{r}_1)] \rangle^2}{m_{\text{air}}} \right]^2. \quad (12)$$

Подставляя последнюю формулу в (10), запишем вид спектральной функции градиента коэффициента преломления в зависимости от спектральной функции градиента концентрации химической примеси:

$$E_{\Delta\theta}(p) = \frac{B^2}{4\pi^2 p_0^2} \left[ \frac{p_a}{T_a^2} \frac{M_a}{M_s} \frac{1}{m_{\text{air}}} \right]^2 E_{\nabla m}(p). \quad (13)$$

Подставляя спектральные функции градиента концентрации примеси (1), (3) – (5) в выражение (13), можно построить спектр флуктуаций градиента коэффициента для всех масштабов неоднородностей.

Известно, что угол рефракции радиоволны, распространяющейся через элементарный слой  $\nabla L$ , зависит от градиента коэффициента преломления следующим образом [5]:

$$\Delta\theta = \frac{1}{2} \Delta L \cos\alpha_0 \nabla n. \quad (14)$$

Тогда после преобразований, аналогичных формулам (10)–(13), запишем спектральную функцию флуктуаций угла рефракции:

$$E_{\Delta\theta}(p) = \left[ \frac{B \Delta L \cos\alpha_0}{4\pi p_0} \frac{p_a}{T_a^2} \frac{M_a}{M_s} \frac{1}{m_{\text{air}}} \right]^2 E_{\nabla m}(p). \quad (15)$$

Произведя интегрирование по всем масштабам турбулентности, вычислим дисперсию угла рефракции радиоволн в пределах элементарного участка пути распространения. После интегрирования по всей траектории распространения луча получаем результирующую дисперсию угла рефракции для трассы протяженностью  $L$ .

### Значения величин, входящих в выражения

Определим численные значения величин и параметров, входящих в полученные выражения. Коэффициенты  $c_0 = 1,3$ ,  $c_1 = 0,41$ ,  $c_2 = 0,25$ ,  $c_3 \varepsilon_3^{-1/3} = 45$  были найдены путем «сшивания» спектральных функций на границе перехода от одного масштаба неоднородности к другому [5]. Для высот нижней тропосферы величина удельной энергии диссипации имеет значение [2]  $\varepsilon = 0,037 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-3}$ , а параметр плавучести  $\beta = 0,035 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{град}^{-1}$ . Из выражения для коэффициента турбулентного перемешивания  $K = L_0 \frac{d\bar{u}}{dz}$  получаем

значение  $K = 2900 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ . Параметры стандартной атмосферы [9]:  $T_0 = 288 \text{ К}$ ;  $p_0 = 101325 \text{ мбар}$ ;  $\frac{dT}{dz} = 5,5 \text{ град} \cdot \text{км}^{-1}$ .

Мера неоднородности температуры определяется соотношением

$$M = K \left( \frac{dT}{dz} \right)^2, \quad (16)$$

откуда получаем значение величины температурной неоднородности  $M = 0,088 \text{ м} \cdot \text{град}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ .

Границей перехода из вязкой области к инерционной является внутренний масштаб турбулентности  $l_0$ . В нижней тропосфере  $l_0$  принимает значения порядка 1 мм [2, 3].

Переход от инерционного интервала к архимедовой подобласти обусловлен усиливающимся влиянием сил плавучести. Граничный масштаб неоднородности [2]:

$$L_K = \varepsilon^{5/4} \beta^{-3/2} M^{-3/4}. \quad (17)$$

После подстановки числовых значений получаем  $L_K = 15 \text{ м}$ .

Границей перехода к крупномасштабной неоднородности является внешний масштаб неоднородности  $L_0$ . В [2] дано выражение для  $L_0$  в виде

$$L_0 = \sqrt{\varepsilon \left( \frac{du}{dz} \right)^{-3}}. \quad (18)$$

Поскольку средний градиент скорости ветра в тропосфере имеет значение  $\frac{du}{dz} = 3,6 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$  [9], то из выражения (18) получаем  $L_0 = 900 \text{ м}$ . Среднее значение коэффициента диффузии  $D_g = 1,55 \cdot 10^{-5} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  [10].

## Влияние водяных паров

Постоянный дипольный магнитный момент присутствует не только у молекул посторонних примесей, но и у молекул воды. Тогда для повышения точности расчетов необходимо учесть влияние постоянно находящихся в атмосфере водяных паров. Весь математический аппарат, приведенный выше, применим и для присутствующего в атмосфере водяного пара. Тем же способом для него рассчитываются спектры флуктуаций угла рефракции. Поскольку дисперсия – величина аддитивная, то, сложив дисперсии углов рефракции волн для загрязняющей примеси и для водяного пара, получим суммарный эффект для реальной турбулентной атмосферы.

## Расчеты и результаты

На основе приведенных выше зависимостей построена модель. По экспериментальным данным, полученным с помощью сети измерительных станций за трехгодичный период, были взяты реальные величины удельного горизонтального градиента концентраций химических примесей в нижних слоях атмосферы. Согласно [11] вертикальный градиент на порядок выше, чем горизонтальный. Максимальные значения вертикального градиента лежат в интервале  $(1 \cdot 10^{-5} \div 5 \cdot 10^{-4}) \text{ мкг/м}^4$ .

На рис. 1 представлен вид спектральной функции флуктуаций градиента коэффициента преломления на всем интервале масштабов турбулентности  $10^{-5} \div 1500 \text{ м}$ , рассчитанный по формуле (13) для радиоволн длиной 25 см.

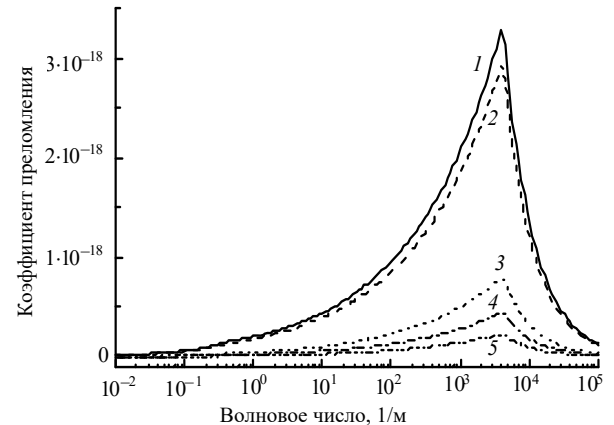


Рис. 1. Спектральная функция флуктуаций градиента коэффициента преломления: 1 – NH<sub>3</sub>; 2 – H<sub>2</sub>O; 3 – H<sub>2</sub>S; 4 – NO<sub>2</sub>; 5 – SO<sub>2</sub>

Максимальные флуктуации наблюдаются вблизи внутреннего масштаба неоднородности и в зависимости от вещества имеют величину порядка  $3,0 \cdot 10^{-18} \text{ 1/м}$ .

На рис. 2 представлена спектральная функция флуктуаций угла рефракции, рассчитанная по формуле (15). Она имеет аналогичный вид и максимальное значение примерно  $4,5 \cdot 10^{-9} \text{ град}$ .

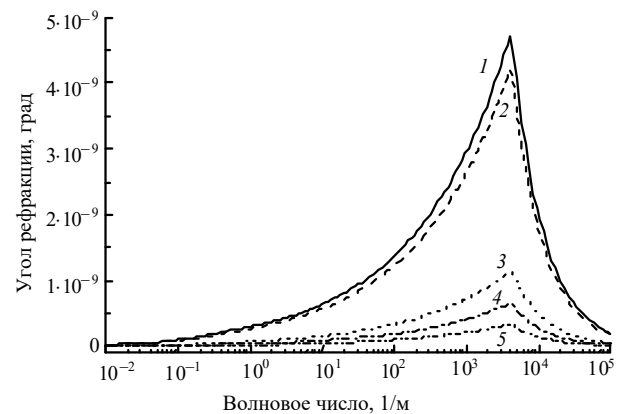


Рис. 2. Спектральная функция флуктуаций удельного угла рефракции: 1 – NH<sub>3</sub>; 2 – H<sub>2</sub>O; 3 – H<sub>2</sub>S; 4 – NO<sub>2</sub>; 5 – SO<sub>2</sub>

Интегрирование выражения (15) по пространству волновых чисел и по длине пути дает результирующую дисперсию угла прихода радиоволны. Результаты расчетов дисперсии угла прихода для различных веществ и при различной величине градиента концентрации примеси представлены в табл. 1. Здесь и далее для модельных расчетов были взяты следующие параметры:  $L = 10 \text{ км}$ , длина радиоволны 25 см.

Часто для практических целей имеет смысл решить обратную задачу, т.е. определить величину градиента концентрации примеси для достаточно большой дисперсии угла рефракции (будем считать ее порядка нескольких градусов). Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Таблица 1

Среднеквадратическое отклонение угла прихода радиоволны, мин, для различных примесей при нескольких значениях градиента концентрации

| Градиент, мг/м | Химическое вещество   |                       |                       |                       |                       |
|----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                | NH <sub>3</sub>       | H <sub>2</sub> O      | H <sub>2</sub> S      | NO <sub>2</sub>       | SO <sub>2</sub>       |
| 0,005          | 1,60·10 <sup>-3</sup> | 1,51·10 <sup>-3</sup> | 7,92·10 <sup>-4</sup> | 5,93·10 <sup>-4</sup> | 4,26·10 <sup>-4</sup> |
| 0,05           | 1,60·10 <sup>-2</sup> | 1,51·10 <sup>-2</sup> | 7,92·10 <sup>-3</sup> | 5,93·10 <sup>-3</sup> | 4,26·10 <sup>-3</sup> |
| 0,5            | 1,60·10 <sup>-1</sup> | 1,51·10 <sup>-1</sup> | 7,92·10 <sup>-2</sup> | 5,93·10 <sup>-2</sup> | 4,26·10 <sup>-2</sup> |

Таблица 2

Градиент концентрации различных примесей, обуславливающий заданное среднеквадратическое отклонение угла прихода радиоволны, мг/м<sup>4</sup>

| Угол отклонения, град | Химическое вещество |                  |                  |                 |                 |
|-----------------------|---------------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|
|                       | NH <sub>3</sub>     | H <sub>2</sub> O | H <sub>2</sub> S | NO <sub>2</sub> | SO <sub>2</sub> |
| 0,1                   | 7,96                | 7,99             | 11,10            | 12,81           | 15,50           |
| 1,0                   | 14,10               | 14,43            | 19,68            | 22,70           | 27,47           |
| 2,0                   | 16,26               | 17,06            | 23,81            | 27,47           | 31,69           |

Как было отмечено ранее, можно учесть влияние водяного пара, содержащегося в атмосфере. Средние значения градиента концентрации воды в тропосфере [9] следующие: зимний период, 50° с.ш. – 0,37 мг/м<sup>4</sup>; летний период, 50° с.ш. – 1,8 мг/м<sup>4</sup>; среднегодовое значение – 3,5 мг/м<sup>4</sup>.

На рис. 3 представлены графики флуктуации угла рефракции для двух веществ в зависимости от градиента концентрации примеси при трех значениях градиента влажности.

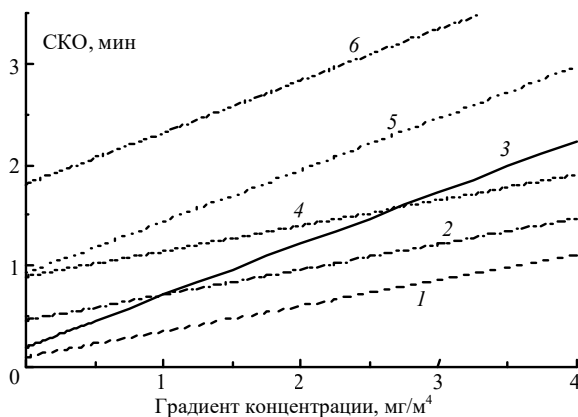


Рис. 3. Среднеквадратическое отклонение угла рефракции с учетом реального градиента влажности: 1, 3, 5 – NH<sub>3</sub> (1,80; 0,37; 3,52); 2, 4, 6 – H<sub>2</sub>S (0,37; 3,52; 1,80)

Для проверки адекватности представленной теории был произведен сравнительный анализ расчетных результатов с экспериментальными наблюдениями. В статье [12] приведены результаты измерений рефракции в тропосфере. Измерялась дисперсия углов рефракции в радиоволновом и оптическом диапазонах. Для радиоволнового диапазона и при протяженности трассы 10 км среднеквадратическое отклонение углов прихода имеет значения: в весенний период порядка 1,2 мин; в летний период – 3,2 мин.

*A.A. Zhuravlev, O.G. Khoutorova. Electromagnetic waves refraction in the polluted turbulent atmosphere.*

On the basis of three-dimensional spectral fluctuation functions of concentration gradient of a passive conservative impurity in the turbulent atmosphere, the refraction phenomenon is investigated and the model is constructed. The spectra of refraction coefficient gradient and fluctuation of refraction angle for all range of inhomogeneity scales are received. The dispersion sizes of arrival angle of radiowave for various levels of air polluting are determined. The sizes of horizontal and vertical concentration gradients of chemical impurity in the troposphere are found from the experimental data. The model accounts for the following substances are carried out: NH<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>. The influence of water vapor is analysed, that has allowed approaching the model to real conditions. The comparison with a number of experimental works has shown a high degree of conformity of this model to some realistic situation.

Модельные расчеты, в отсутствие загрязняющей примеси, дают нам следующие значения СКО: весна – 0,9 мин, лето – 1,9 мин. Несколько заниженная величина расчетной дисперсии углов рефракции объясняется тем, что представленная теория не учитывает неоднородности температурного поля и давления, которые оказывают влияние примерно того же порядка.

В статье [13] проводились измерения углов рефракции в прибрежной зоне в сантиметровом диапазоне волн. Измеренные значения среднеквадратического отклонения сосредоточены в диапазоне 8; 12 мин. Для сантиметрового диапазона волн модель дает СКО порядка 11,2 мин.

Сравнение показывает достаточно высокую степень соответствия представленной модели и реальных измерений.

## Заключение

Выражения, полученные для трехмерных спектральных функций градиента коэффициента преломления и угла рефракции электромагнитной волны при различных масштабах неоднородностей, верны для любой пассивной, консервативной, полярной примеси, включая водяные пары.

На основе экспериментальных данных определен вертикальный градиент распределения примеси в тропосфере. Эти выражения были применены для расчета дисперсии углов рефракции электромагнитных волн на турбулентных неоднородностях.

В качестве примера для расчетов были взяты такие химические вещества, как NH<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub> и водяной пар. Модель показала высокую степень соответствия реально наблюдаемой картине.

1. Обухов А.М. Турбулентность и динамика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 414 с.
2. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.
3. Тептин Г.М., Стенин Ю.М. Неоднородная структура нижней ионосферы и распространение радиоволн. Казань: КГУ, 1989. 96 с.
4. Тептин Г.М. Нелинейные явления в долгопериодных колебаниях атмосферы. Казань: КГУ, 1986. 128 с.
5. Хуторова О.Г. Спектр турбулентных флуктуаций градиента электронной концентрации в нижней ионосфере. М., 1993. 10 с. Деп. в ВИНТИ. 06.07.93, № 2452В93.
6. Долуханов М.П. Флуктуационные процессы при распространении радиоволн. М.: Связь, 1971. 127 с.
7. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн. М.: Сов. радио, 1972. 464 с.
8. Осипов О.А. Справочник по дипольным моментам. М.: Наука, 1971. 414 с.
9. Семенов Ю.С. Атмосфера: Справочник. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 77 с.
10. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 720 с.
11. Васильев А.В., Мельникова Е.Н., Михайлов В.В. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1994. №5. С. 661–666.
12. Андрианов В.А., Ветров В.И., Ракитин Б.В. // XII Всес. конф. по распространению радиоволн: Тезисы докл. М.: Наука, 1978. С. 142–145.
13. Бадулин Н.Н., Ерохин А.В., Маслов Е.В. // XII Всес. конф. по распространению радиоволн: Тезисы докл. М.: Наука, 1978. С. 13–16.