

МОДЕЛЬ, ОТРАЖАЮЩАЯ ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ИЗМЕНЕНИЯ ПРЕЛОМЛЯЮЩИХ СВОЙСТВ АТМОСФЕРЫ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИМЕЮЩИХСЯ СЛУЧАЙНЫХ ДАННЫХ

Бобров В.Н.¹, Корчагин В.В.¹, Кобзистый С.Ю.¹

¹ФКОУ ВПО «Воронежский институт ФСИН России», Воронеж, Россия (394072, Воронеж, ул. Иркутская, 1 «а»), e-mail: vifsin@mail.ru

В статье рассматривается модель, отражающая особенности пространственного изменения преломляющих свойств атмосферы на основе использования имеющихся случайных данных о фактическом состоянии приземного слоя атмосферы. В работе проведены расчеты вертикальной и горизонтальной составляющих градиента показателя преломления атмосферы в декартовой системе координат. Для практических расчетов предлагается использовать следующую ориентацию: ось абсцисс Ox направить на юг, ось ординат Oy направить на восток, а ось аппликат Oz направить вверх. Восстановление градиента показателя преломления было проведено по данным температурно-ветрового зондирования атмосферы по известным методикам. Были проведены расчёты модуля градиента показателя преломления у земной поверхности и по высотам в узлах сетки, определяемой пересечением меридианов через каждые 5° (15° з.д. – 30° в.д.) с 50° с.ш. В результате расчетов получены абсолютные значения градиента показателя преломления и его отклонения по осям декартовой системы координат. Установлено что во всех узлах сетки, как у земной поверхности, так и по высотам, имеет место отклонение градиента показателя преломления от соответствующих осей. При решении практических задач, учитывающих преломляющие свойства атмосферы, необходимо использовать информацию, учитывающую фактическое состояние приземного слоя атмосферы.

Ключевые слова: показатель преломления атмосферы, декартова система координат, вертикальная и горизонтальная составляющая градиента, пространственное положение.

MODEL REFLECTING THE FEATURES OF THE SPATIAL PROPERTIES OF THE ATMOSPHERE REFRACTS CHANGE UTILIZING EXISTING RANDOM DATA

Bobrov V.N.¹, Korchagin V.V.¹, Kobzisty S.Y.¹

¹ Voronezh Institute of the Russian Federal Penitentiary Service, Voronezh, Russia (394072, Voronezh, street Irkutskay 1-a.), vifsin@mail.ru

In this paper we consider a model that reflects the features of the spatial variation of the refractive properties of the atmosphere through the use of available random data on the actual state of the atmospheric boundary layer. The paper calculated the vertical and horizontal components of the gradient of the refractive index of the atmosphere in the Cartesian coordinate system. For practical calculations it is proposed to use the following orientation: the horizontal axis Ox headed south, the ordinate axis Oy headed east, and the axis Oz applicate send up. Recovery of the refractive index gradient was performed according to the temperature-sensing windshield atmosphere by known methods. Calculations were carried out modulus of the gradient of the refractive index at the surface and in height at the grid points defined by the intersection of the meridian every 5° (15° W – 30° E) with 50° N. The calculations obtained absolute values of the refractive index gradient and its rejection of the axes of the Cartesian coordinate system. It has been established that in all grid nodes, like the earth's surface, and on the heights, there is a deviation of the refractive index gradient from the respective axes. In solving practical problems, taking into account the refractive properties of the atmosphere, it is necessary to use the information, taking into account the actual state of the atmospheric boundary layer.

Keywords: the refractive index of the atmosphere, a Cartesian coordinate system, the vertical and the horizontal component of the gradient, the spatial position.

Происходящие в атмосфере пространственно-временные изменения гидрометеорологических величин определяют сложные изменения показателя преломления атмосферы (атмосферная рефракция). Различают случаи, когда в атмосфере имеет место отрицательная рефракция, рефракция отсутствует или же атмосферная рефракция

положительна [4]. В качестве основного критерия, используемого при классификации атмосферной рефракции, применяется вертикальный градиент показателя преломления (dN/dh , 1/м) [4].

Наибольшие изменения показатель преломления атмосферы претерпевает по вертикали в нижнем слое атмосферы, что обусловлено большими изменениями в этом слое температуры и влажности [1-5, 7].

В практической деятельности при проведении соответствующих расчетов используются сведения об изменениях показателя преломления атмосферы только по высоте. Горизонтальные же изменения показателя преломления атмосферы в расчетах не учитываются, что является не совсем корректным.

Цель работы - построение модели, отражающей особенности пространственного изменения преломляющих свойств атмосферы на основе использования имеющихся случайных данных о гидрометеорологических величинах.

Материалы исследований. Известно, что градиент некоторой скалярной величины f ($grad f$) есть вектор, совпадающий с нормалью N к эквискалярной поверхности. По модулю он равен производной от f по N , но с обратным знаком [6]:

$$|gradf| = -\frac{df}{dN}. \quad (1)$$

Используемые в практической деятельности сведения об изменении градиента показателя преломления в основном касаются его вертикальной составляющей, поскольку показатель преломления претерпевает значительные изменения по высоте. Это учитывается в различных сферах деятельности, где имеет место рассмотрение вопросов, связанных с атмосферной рефракцией [3].

Достаточно подробно влияние вертикальной составляющей градиента показателя преломления изложено в работе [3] (в условиях представления атмосферы в виде плоско-слоистой среды) и в работе [7] (в условиях, когда имеет место сферическое строение атмосферы).

В [1] была предложена методика расчета отклонений траектории оптического сигнала от прямолинейной, основанная на учете горизонтальной составляющей градиента показателя преломления атмосферы. Полученные в [1, 2] математические выражения позволяют провести расчеты возможных ошибок при определении положения объектов в пространстве, а также вычислить величину угла рефракции. В этих выражениях используется информация о фактическом состоянии гидрометеорологических параметров атмосферы.

Однако рассмотренные в [1, 2] вопросы не в полной мере отражают происходящие в атмосфере процессы.

По определению градиент скалярного поля

$$\text{grad } n = \frac{\partial n}{\partial x} \cdot \vec{i} + \frac{\partial n}{\partial y} \cdot \vec{j} + \frac{\partial n}{\partial z} \cdot \vec{k}, \quad (2)$$

где $n=n(x, y, z)$ – скалярная функция, определяющая поле распределения показателя преломления атмосферы.

Для удобства обозначим $\vec{n} = \text{grad } n$.

Выражение (2) перепишем иначе:

$$\vec{n} = \text{grad } n = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}, \quad (3)$$

где x, y, z – проекции вектора \vec{n} на соответствующие оси координат. Для данной точки пространства эта величина определяется однозначно.

В работах [3, 7] рассматриваются случаи, когда справедливо следующее соотношение:

$$\vec{n} = z\vec{k}, \quad (4)$$

т.е. изменением значений показателя преломления атмосферы n по направлениям Ox и Oy пренебрегают.

В работе [1] учитываются изменения показателя преломления атмосферы в горизонтальном направлении, т.е. по осям Ox и Oy . Тогда:

$$\vec{n} = x\vec{i} + y\vec{j}. \quad (5)$$

Очевидно, что при решении различного рода задач следует учитывать составляющие показателя преломления по всем трем осям декартовых координат.

Для практических расчетов далее предлагается использовать следующую ориентацию: ось абсцисс Ox направить на юг, ось ординат Oy - на восток, а ось аппликат Oz - вверх.

Поместим начало произвольного вектора \vec{n} в начало системы декартовых координат в точку O с $\beta = (\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ – ортонормированным базисом. (на рис. 1).

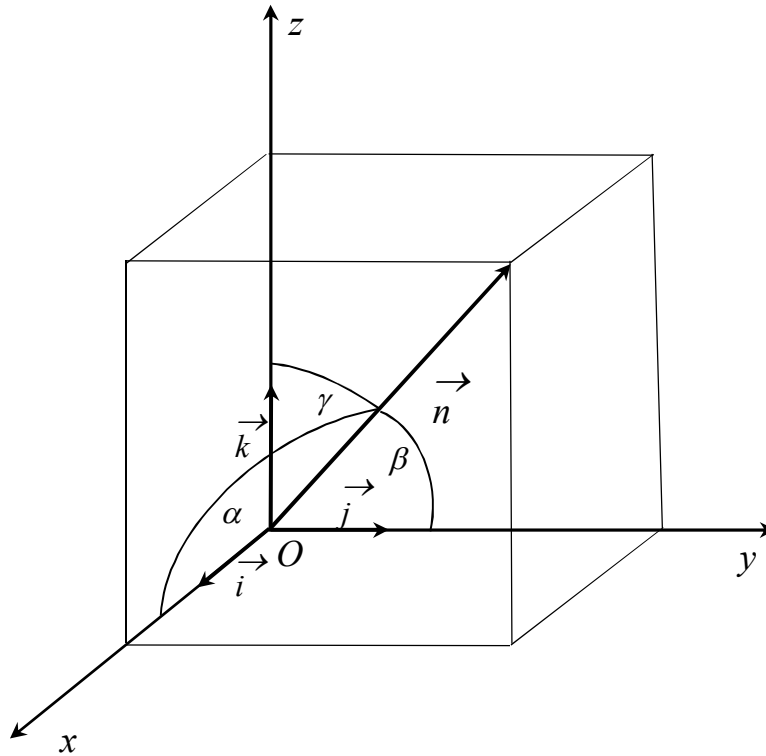


Рис. 1.

Разложив вектор \vec{n} по базису, получим:

$$\vec{n} = n_x \vec{i} + n_y \vec{j} + n_z \vec{k}, \quad (6)$$

где n_x, n_y, n_z – соответствующие проекции вектора на оси координат.

Модуль вектора может быть определен из выражения:

$$|\vec{n}| = \sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}. \quad (7)$$

Из рис. 1 имеем:

$$\begin{aligned} n_x &= |\vec{n}| \cos(\vec{n}, \vec{i}) = |\vec{n}| \cos \alpha; \\ n_y &= |\vec{n}| \cos(\vec{n}, \vec{j}) = |\vec{n}| \cos \beta; \\ n_z &= |\vec{n}| \cos(\vec{n}, \vec{k}) = |\vec{n}| \cos \gamma. \end{aligned} \quad (8)$$

Тогда направляющие косинусы вектора \vec{n} :

$$\begin{aligned} \cos \alpha &= \frac{n_x}{|\vec{n}|} = \frac{n_x}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}}; \\ \cos \beta &= \frac{n_y}{|\vec{n}|} = \frac{n_y}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}}; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\cos \gamma = \frac{n_z}{|\vec{n}|} = \frac{n_z}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}}.$$

Авторами было проведено восстановление в декартовой системе координат положения градиента показателя преломления по данным температурно-ветрового зондирования атмосферы, проведенного по методике, представленной в [1]. При восстановлении значений показателя преломления атмосферы было использовано известное соотношение [1-3, 5]:

$$n = 1 + 10^{-6} N = 1 + 10^{-6} \left[\frac{77,6}{p} \left(p + 4810 \frac{e}{T} \right) \right], \quad (10)$$

где p - атмосферное давление (мб);

e – парциальное давление водяного пара ($г/м^3$);

T - температура воздуха (К).

В качестве исходных данных было использовано фактическое состояние атмосферы 23 декабря 2012 года по материалам, представленным на информационном ресурсе <http://www.wetter3.de/> в разделе Vertikalschnitte (GFS).

Сведения о величине горизонтальной и вертикальной составляющих градиента показателя преломления атмосферы, выраженных в N -единицах, представлены в таблицах 1 и 2 соответственно.

Таблица 1

Данные о распределении значений горизонтальной составляющей градиента показателя преломления атмосферы (N -ед/100км) вдоль 50° северной широты

Высота, м	15°з.д.	10°з.д.	5°з.д.	0	5°в.д.	10°в.д.	15°в.д.	20°в.д.	25°в.д.	30°в.д.
0	-0,373	0,0491	0,01	-0,004	0,082	0,03	0,031	0	0	0
1500	-0,259	0,007	-0,02	0,105	-0,05	0,03	0,064	0	0	0
3000	-0,135	0,025	0	0,053	-0,03	0,048	0,027	0,004	0	0
5000	-0,019	-0,022	0,007	0,069	-0,085	0,087	0,033	0,008	-0,023	0

Таблица 2

Данные о распределении значений вертикальной составляющей градиента показателя преломления атмосферы (N -ед/100м) вдоль 50° северной широты

Высота, м	15°з.д.	10°з.д.	5°з.д.	0	5°в.д.	10°в.д.	15°в.д.	20°в.д.	25°в.д.	30°в.д.
0-1500	2,930	2,369	2,577	2,693	2,153	2,805	2,8	2,636	2,636	2,636
1500-3000	3,411	2,797	2,706	2,616	2,874	2,756	2,667	2,85	2,829	2,829
3000-5000	2,920	2,491	2,665	2,639	2,579	2,795	2,653	2,63	2,615	2,7

Восстановим на примере точки с координатами 15° з.д. и 50° с.ш. модуль градиента показателя преломления атмосферы у земной поверхности и по высотам, а затем рассчитаем значения направляющих косинусов. В качестве исходных данных будем использовать данные, представленные в таблицах 1, 2.

Применяя декартову систему координат (рис. 1), несложно получить по формуле (7) значение модуля градиента показателя преломления атмосферы:

$$|\vec{n}| = \sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2} = \sqrt{(-0,344)^2 + (-0,373)^2 + 2,93^2} = 2,940047.$$

Подставляя в (9) полученное значение, рассчитаем величину соответствующих направляющих косинусов. Получим: $\cos\alpha=0,00012$, $\cos\beta=0,00013$, $\cos\gamma=0,99919$.

Аналогичным образом были рассчитаны модули градиента показателя преломления у земной поверхности и по высотам в узлах сетки, определяемых на пересечении меридианов через каждые 5° (15° з.д. – 30° в.д.) с параллелью 50° с.ш. Результаты расчетов представлены в таблице 3.

Таблица 3

Значения модуля градиента показателя преломления атмосферы и направляющих косинусов за 23.12.2012 года в слое 0-5000 м.

	долгота								
	15°з.д.- 10°з.д.	10°з.д.- 5°з.д.	5°з.д.- 0	0- 5°в.д.	5°в.д.- 10°в.д.	10°в.д.- 15°в.д.	15°в.д.- 20°в.д.	20°в.д.- 25°в.д.	25°в.д.- 30°в.д.
0-1500 м									
$ \vec{n} $	2,931	2,37	2,577	2,693	2,154	2,805	2,8	2,636	2,636
$\cos\alpha$	0,015	0,019	0,017	0,016	0,02	0,015	0,015	0,016	0,016
$\cos\beta$	0,011	-0,002	0	0	-0,003	0	0	0	0
$\cos\gamma$	0,9998	0,9998	0,999	0,999	0,9997	0,9998	0,998	0,9998	0,9998
1500-3000 м									
$ \vec{n} $	3,411	2,798	2,71	2,616	2,874	2,757	2,667	2,85	2,829
$\cos\alpha$	0,016	0,02	0,02	0,002	0,019	0,019	0,02	0,019	0,019
$\cos\beta$	0,006	-0,002	0	-0,003	0,001	0	0	0	0
$\cos\gamma$	0,9998	0,999	0,999	0,999	0,9998	0,9998	0,9997	0,9998	0,9998
3000-5000 м									
$ \vec{n} $	2,921	2,491	2,665	2,639	2,579	2,756	2,653	2,63	2,615
$\cos\alpha$	0,013	0,016	0,015	0,015	0,016	0,019	0,015	0,015	0,015
$\cos\beta$	0,003	0	0	-0,001	0	0	0	0	0
$\cos\gamma$	0,9998	0,999	0,999	0,999	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998

В результате проведенных расчетов установлено, что максимальные изменения градиента показателя преломления атмосферы наблюдаются по вертикали. Однако имеют место и горизонтальные изменения, но их абсолютные значения на один-два порядка меньше значений вертикальных составляющих.

Установлено, что абсолютные значения градиента показателя преломления незначительно отличаются от значений его вертикальной составляющей. Величина таких отличий находится в пределах от 0 до 0,1 относительно значений вертикальной

составляющей. При этом отклонения градиента показателя преломления относительно оси аппликат составляют $1^\circ - 2^\circ$ (см. значения $\cos\gamma$, таблица 3). Отклонения же градиента по осям абсцисс и ординат находятся в пределах $88^\circ - 89^\circ$ (см. значения $\cos\alpha$ и $\cos\beta$, таблица 3). Эти отклонения градиента от соответствующих осей координат позволяют говорить о неравномерном характере распределения показателя преломления относительно земной поверхности.

Заключение. Полученные в результате расчетов абсолютные значения градиентов показателя преломления атмосферы и отклонения составляющих градиента показателя преломления по осям декартовой системы координат имеют место, как у земной поверхности, так и по высоте. При рассмотрении вопросов, связанных с влиянием преломляющих свойств атмосферы необходимо учитывать фактические значения параметров атмосферы и их изменения по осям координат. Последнее позволит установить распределение поля показателя преломления в выбранной системе координат по всем осям.

Список литературы

1. Бобров В.Н., Корчагин В.В. Исследование математических закономерностей моделей случайных явлений в градиентной среде // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5; URL: <http://www.science-education.ru/119-15162> (дата обращения: 31.10.2014).
2. Бобров В.Н., Корчагин В.В. Построение математической модели случайного положения воздушного судна при заходе на посадку // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6; URL: <http://www.science-education.ru/120-15417> (дата обращения: 18.11.2014).
3. Бобров В.Н., Нахмансон Г.С. О сезонном и суточном изменении вертикального профиля показателя преломления атмосферы в приземном слое // Метеорология и гидрология. – 2002. - №12. - С.36- 39.
4. Долуханов М.П. Распространение радиоволн. Учебник для вузов. М., «Связь», 1972. 336с.
5. Казаков Л.Я., Ломакин А.Н. Неоднородности коэффициента преломления воздуха в тропосфере. – М.: Наука, 1976. 165с.
6. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. – СПб.: Гидрометеиздат, 2000. – 778с.
7. Нахмансон Г.С., Карпюк Д.А. Об учете вертикального распределения показателя преломления в приземном слое атмосферы при визуальном определении местоположения взлетно-посадочной полосы с борта воздушного судна // Метеорология и гидрология. – 2004. - №2. - С.57 - 63.

Рецензенты:

Душин А.В., д.т.н., доцент, начальник кафедры управления и информационно-технического обеспечения, ФКОУ ВПО «Воронежский институт ФСИН России», г. Воронеж;

Сумин В.И., д.т.н., профессор, профессор кафедры управления и информационно-технического обеспечения, ФКОУ ВПО «Воронежский институт ФСИН России», г. Воронеж.