

# ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 537.876; 621.371.38

## О НЕОБХОДИМОСТИ УЧЕТА МИКРОКЛИМАТИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ВЕРТИКАЛЬНОГО АТМОСФЕРНОГО ОСЛАБЛЕНИЯ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ВОЛН

Н.В. РУЖЕНЦЕВ, А.С. МИХАЙЛОВ

Работа посвящена выяснению уровня правомерности применения наиболее широко используемых в Европе в разнообразных радиофизических приложениях моделей высотных профилей метеоданных. Оценено влияние региональной и сезонной изменчивости на предпочтительность использования этих моделей, определены наиболее эффективные из них для расчетов атмосферного ослабления и апробирован путь повышения их адекватности.

*Ключевые слова:* атмосферное ослабление, миллиметровый диапазон, вертикальные профили метеопараметров.

### ВВЕДЕНИЕ

При решении научных и практических задач радиосвязи, дистанционного зондирования окружающей среды (ДЗ ОС), радиоастрономии важную роль играет возможность адекватного прогнозирования величины вертикального ослабления радиоволн миллиметрового диапазона (ММ ДВ) в атмосфере, а также прогнозирования высотной изменчивости этого параметра. Эти сведения важны и используются при определении радиояркости космических и земных объектов ДЗ с целью восстановления их физических параметров (например, содержания атмосферного озона или влажности атмосферы), при проектировании и оптимизации частотных диапазонов и в оценках надежности перспективных наземно-космических телекоммуникационных линий и сетей связи, в военных приложениях, при проведении калибровочных процедур радиометрической аппаратуры и др.

Как правило, расчет значений ослабления на вертикальных и наклонных трассах производится на основе сочетания выбранных радиофизических моделей и измеряемых либо среднестатистических приземных метеопараметров, а также моделей высотных профилей распределения этих метеорологических параметров (температуры, влажности и давления).

Среди радиофизических моделей описывающих поглощение атмосферными газами в ММ ДВ можно отметить различные модификации моделей Розенкранца, Ингланда, Вотера, Жевакина, Наумова, Зражевского, Лиоба и др. При этом, в последнее десятилетие, пожалуй, наибольшее распространение получили полуэмпирические МРМ модели Лиоба [1], основанные на представлении атмосферного затухания в газах, состоящего из вклада трех составляющих:

$$\gamma(f) = \gamma_l + \gamma_d + \gamma_c$$

(где  $\gamma_l$  – резонансный вклад 44-х спектральных линий для молекулы  $O_2$  и 30-ти линий для

молекулы  $H_2O$ ,  $\gamma_d$  – нерезонансный вклад сухого воздуха,  $\gamma_c$  – вклад континуума водяного пара)

Среди моделей высотного распределения метеорологических параметров можно выделить модели, разработанные на основе базы данных US-60 и их модификации, наиболее распространенные во второй половине прошлого века для средних широт (СШ) северного полушария [2] (1-3):

$$T = T_0 \cdot (1 - (6,5 \cdot h/288))^{5,225}, \quad (1)$$

$$M = M_0 \cdot \exp(-h/2,2), \quad (2)$$

$$P = P_0 \cdot \exp(-0,023 \cdot h), \quad (3)$$

где  $T_0$ ,  $M_0$ ,  $P_0$  – температура, влажность и давление в приземном слое воздуха соответственно,  $h$  – высота над землей.

В 90-е годы прошлого века получили распространение рекомендованные ИТУ (International Telecommunication Union) модели P.835-3 уже адаптированные к климатическим поясам (в частности, ниже либо выше  $45^\circ$  и  $22^\circ$  северной широты) и к теплоте и холодному времени года [3]. На протяжении многих десятилетий эти модели лежали в основе радиофизических оценок вертикального поглощения атмосферой в различных регионах мира. Отсутствие возможности учета долготной, региональной, помесечной и др. изменчивостей высотных профилей метеопараметров можно отнести к недостаткам этих наиболее распространенных метеорологических моделей высотных профилей и их модификаций.

Заметим, что современные радиофизические модели описывающие атмосферное ослабление на основании метеоданных, полученных, например, радиозондовыми измерениями, позволяют обеспечить точность определения погонного или вертикального ослабления в единицы процентов. Однако, в наиболее часто встречаемых в практике радиометрии случаях использования приземных метеоданных в совокупности с моделями

их высотного вертикального распределения, точность расчетов атмосферного ослабления существенно снижается, – иногда до 50% и более. Степень этого ухудшения точности зависит от типа используемой модели высотного профиля, климатических особенностей региона и времени года, реальной метеоситуации и др.. Поэтому оценка применимости той или иной модели высотного распределения метеопараметров для расчетов атмосферного ослабления в конкретной местности, выявление лучшей или создание новой модели продолжает являться актуальной для радиофизических приложений задач.

В связи с этим, особого внимания заслуживает пока не нашедший широкого применения наиболее современный стандарт атмосферы, разработанный в ESA (Европейское космическое агентство) [4]. В 2004 г. ITU рекомендовало этот новый численный стандарт атмосферы, кардинально отличающийся по своим функциональным возможностям и методу его создания от всех предыдущих. Этот стандарт был разработан на основе базы данных ERA-15, содержащей радиозондовые данные около 700 станций мира за 15-летний период регулярных радиозондовых наблюдений, а также данные морских экспедиций. К его достоинствам следует отнести возможность обеспечения среднемесячными значениями метеопараметров для любой точки мира до высот 32км с возможностью учета рельефа местности, месяца и времени суток. Проведенные нами в последние годы исследования работоспособности этого стандарта [5-8] показали его применимость и преимущества перед предшествующими аналогами для многих практических задач радиометрии ММ ДВ, дистанционного зондирования, астроклиматических оценок и др. вследствие достаточно высокой адекватности описания ослабления с его помощью для равнинной и прибрежной территории Украины, и даже для высокогорных регионов мира. В связи с этим, в данной работе для определения эффективности наиболее распространенных к настоящему времени в радиофизических приложениях моделей высотных профилей метеопараметров атмосферы мы использовали данный стандарт в качестве реперного.

## 1. МЕТОДОЛОГИЯ

Целью данной работы является выяснение уровня правомерности применения в регионах Европы и, в частности, на Украине традиционных моделей высотных профилей метеоданных, широко используемых здесь на протяжении десятилетий в разнообразных радиофизических приложениях, а также поиск путей уточнения этих моделей.

Для изучения влияния региональной изменчивости нами были произвольно выбраны попарно расположенные на трех разных широтах, но разнесенные по долготе, города. Это Челябинск

и Москва (Россия), Харьков и Франкфурт (Германия), а также Феодосия и Болонья (Италия).

Расчеты среднемесячных значений полного вертикального ослабления для всех этих городов проводились с помощью радиофизической МРМ модели Лиоба в совокупности с моделями высотных профилей температуры, влажности и давления, описываемыми тремя видами метео моделей, условно выделенных в статье как «СШ» [2], «ITU-99» [3] и «ERA» [4]. Все расчеты в статье проводились для частоты 94 ГГц, однако надо иметь в виду, что полученные для этого окна прозрачности атмосферы качественные выводы будут справедливы и для других окон прозрачности ММ ДВ.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе последнего стандарта атмосферы и полученных с помощью моделей СШ [2], ITU-99 [3] высотных профилей метеоданных и их приземных значений, взятых из упомянутого стандарта ERA [4], нами были построены высотные зависимости температуры и влажности воздуха для двенадцати месяцев года в шести вышеотмеченных городах. Анализ этих зависимостей позволил заметить, что для различных регионов характерны разные закономерности влияния сезона на применимость той или иной из рассмотренных моделей. О количественных отличиях можно судить на основании, приведенных в качестве примера на рис. 1а-б зависимостей высотных профилей температуры и влажности атмосферы для координат Крымской научно-исследовательской геофизической обсерватории (КНИГО) в январе и июле.

Результаты расчетов атмосферного ослабления показывают, что в отдельных регионах тестируемая нами пара моделей высотного распределения температуры и влажности воздуха в совокупности с МРМ моделью ослабления, дает отличия от выраженных в дБ значений поглощения, рассчитанных по стандарту атмосферы «ERA» от 2-3% до 40%, в зависимости от времени года. Причем, в разных регионах, даже на одной широте и в одни и те же месяцы большей эффективностью (наилучшим согласием с расчетами на основе стандарта «ERA») могут отличаться разные модели (например, рис. 2).

В таблице для всех выбранных в качестве тестовых регионов приведены оценки минимально достижимых для отдельных месяцев отличий, полученные путем выбора наиболее приемлемой из тестируемых нами моделей. (Здесь для наглядности для каждого из тестируемых регионов наиболее приемлемые для каждого месяца модели выделены шрифтом).

Эти результаты демонстрируют возможность существенного снижения (в разы) значений таких различий до 1-20% в зависимости от месяца года. Причем, для отдельных регионов выбором соответствующей наиболее эффективной для отдельных месяцев года модели можно добиться

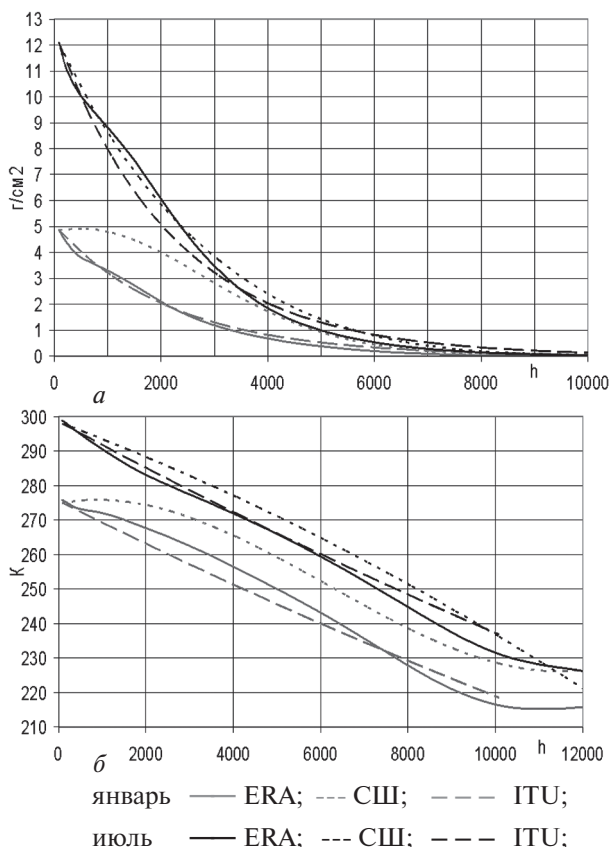


Рис. 1. Примеры высотных профилей влажности (г/м<sup>3</sup>) и температуры (К) воздуха, соответствующие разным моделям в КНИГО (Феодосия)

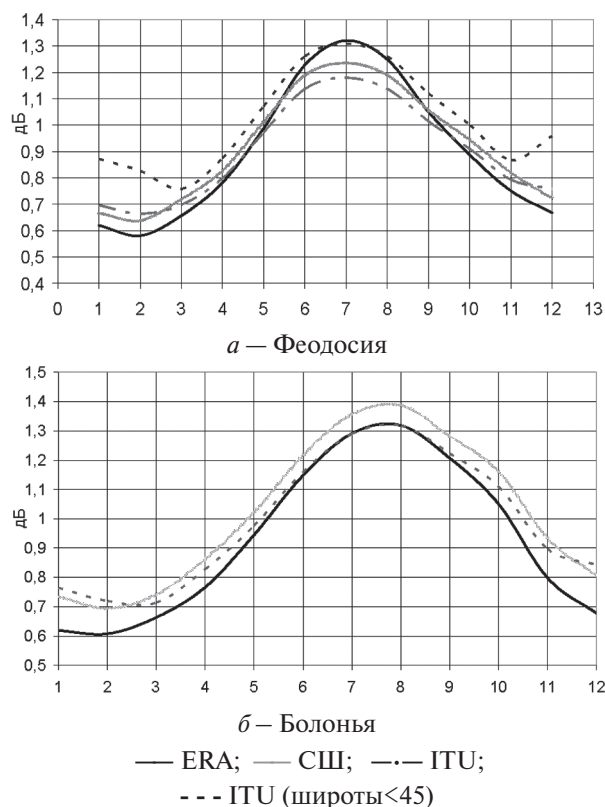


Рис. 2. Примеры зависимостей полного вертикального ослабления в атмосфере на частоте 94 ГГц, рассчитанные для различных моделей вертикального распределения метеопараметров

**Таблица** процентных отличий для выраженных в дБ значений вертикального атмосферного ослабления, рассчитанных с использованием «СШ» и «ITU» моделей от рассчитанных на основе стандарта «ERA»

город	Модель профиля	я	ф	м	а	май	и	июль	авг.	с	о	н	д
Феодосия (КНИГО) N45°, E35°	СШ	<b>8%</b>	<b>10</b>	10	13	12	5	6	5	<b>1</b>	13	10	<b>7</b>
	ITU < 45°	40	43	15	13	35	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	8	25	16	45
	ITU > 45°	12	15	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	7	11	9	4	<b>13</b>	<b>5</b>	15
Болонья N45°, E11°	СШ	<b>19%</b>	18	12	12	8	5	5	5	6	11	16	<b>21</b>
	ITU < 45°	20	<b>18</b>	<b>9</b>	<b>8</b>	<b>3</b>	<b>&lt;1</b>	<b>&lt;1</b>	<b>&lt;1</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>13</b>	
Харьков N50°, E36°	СШ	<b>4%</b>	<b>4</b>	<b>&lt;1</b>	6	6	9	9	8	8	8	<b>2</b>	<b>10</b>
	ITU > 45°	16	4	8	<b>&lt;1</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	2	13
Львов N50°, E24°	СШ	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	4	10	10	9	3	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>4</b>
	ITU > 45°	20	26	7	3	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	4	5	22
Франкфурт N 50°, E 8°	СШ	<b>5%</b>	<b>10</b>	<b>8</b>	<b>6</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	4	6	<b>4</b>	<b>10</b>	<b>13</b>	<b>6</b>
	ITU > 45°	5	36	13	11	6	4	<b>1</b>	<b>1</b>	10	16	19	40
Москва N55°, E37°	СШ	<b>9%</b>	5	9	9	9	10	5	8	6	3	<b>&lt;1</b>	<b>2</b>
	ITU > 45°	14	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>3</b>	7	10
Челябинск N 55°, E 62°	СШ	6	11	8	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	4	<b>2</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	5	8
	ITU > 45°	<b>3%</b>	<b>9</b>	<b>3</b>	6	3	4	<b>2</b>	6	10	9	<b>2</b>	<b>&lt;1</b>

погрешностей расчета ослабления атмосферой менее 3-5% лишь для отдельных периодов года (Франкфурт, Крым, Болонья), а в остальные периоды она может достигать 10-20%. Для других регионов (Москва, Челябинск, Харьков, Львов) величина погрешности обеспечиваемой оптимальным выбором вида модели не превышает 3-5% в течение всего периода года, за исключением одного из зимних месяцев.

Возможность дополнительного снижения ошибок прогнозирования среднемесячных

значений полного вертикального ослабления может быть обеспечена путем аналитического представления для каждого конкретного месяца и региона содержащихся в стандарте ERA-15 численных значений высотных профилей метеопараметров.

Результаты аналитического описания этих зависимостей путем их кусочно-линейной аппроксимации для температуры и линейно-экспоненциальной для влажности показали возможность достижения согласия в значениях



ослабления лучше 1% в течение всего периода года. Полученным таким путем аналитическим выражением для заданных географических координат и периода года следует отдать предпочтение для практического использования в задачах восстановления параметров атмосферы по данным ДЗ, калибровки радиометрической аппаратуры по радиоизлучению атмосферы, при решении методических вопросов наблюдательной радиоастрономии и климатологии.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе:

— продемонстрировано влияние региональной и сезонной изменчивости на предпочтительность использования в радиофизических приложениях наиболее распространенных в последние десятилетия в Европе моделей, описывающих высотные распределения температуры и влажности атмосферы;

— для каждого месяца года для семи регионов Европы (в том числе юга, востока и запада Украины) определены метеорологические модели наиболее эффективные для расчетов атмосферного ослабления радиоволн ММ диапазона;

— отмечена и апробирована важная для проведения радиофизических применений возможность получения аналитических выражений для описания среднемесячных высотных профилей температуры и влажности с максимально возможной на сегодняшний день достоверностью, определяемой стандартом атмосферы «ERA» [4].

### Литература.

- [1] *Liebe H.J.* MPM – an atmospheric millimeter waves propagation model. // Int. Journal of Infrared and Millimeter Waves. June 1989, v.10, № 6, pp. 631–650
- [2] *Айвазян Г.М.* Распространение миллиметровых и субмиллиметровых волн в Облаках. / Справочник под общей редакцией Г.Г. Шукина. Ленинград, Гидрометеоздат, 1991, 480 с.
- [3] ITU-R P.835-3. 1999, Reference standard atmospheres, ITU-R Series Recommendations – Radiowave Propagation.
- [4] *A. Martellucci, B.A. Rastburg, J.P.V. Poyares Baptista, G. Blarzino* “New reference standard atmospheres based on numerical weather products” // Abstracts of International Workshop - ClimDiff ‘ 2003, pp.clim.1, Fortaleza, Brazil, 2003
- [5] *N.V. Ruzhentsev, A.S. Mihailov, A.M. Shirin* Investigations of Season-Diurnal Dependencies of Atmospheric Absorption with Usage of Model ERA-15 and its Additional Testing // Abstracts of URSI Commission-F Open Symposium on Radio Wave Propagation and Remote Sensing, (ISBN 978-85-87926-26-5), Rio de Janeiro, Brazil, 30 Oct /02 Nov 2007, p.RS 3.3
- [6] *N.V. Ruzhentsev, A.S. Mikhailov* Peculiarities of global distribution of atmosphere absorption at 10-1000 GHz range // Proc. of International Conf. ClimDiff 2005, Clivland, USA. Sept., 2005, p.clim. 11.1-11.5
- [7] *А.С. Михайлов, Н.В. Руженцев* Особенности глобального распределения атмосферного поглощения в диапазоне 10-1000 ГГц // “Радиофизика и Радиоастрономия», 2007 т.12, № 1, с.76- 83
- [8] *Nikolay V. Ruzhentsev, Alexander S. Mihailov* The capabilities of the calculated approach for the astroclimatic assessment in radioastronomy // International Journal Natural Science, Vol.2, No.5, p. 427-431 (2010) doi: 10.4236/ns.2010.25052

Поступила в редколлегию 25.01.2012

**Руженцев Николай Викторович**, с.н.с., к.т.н., старший научный сотрудник кафедры радиоэлектронных приборов ХНУРЭ. Область научных интересов: исследования радиофизических свойств объектов окружающей среды, развитие аппаратуры и методов дистанционного зондирования в миллиметровом диапазоне радиоволн.



**Михайлов Александр Сергеевич**, инженер-исследователь отдела микроволновой радиоспектротометрии РИ НАН Украины. Область научных интересов: исследования радиофизических свойств атмосферы Земли в миллиметровом диапазоне радиоволн.



УДК 537.876; 621.371.38

**О необхідності урахування мікрокліматичних особливостей що до прогнозування вертикального атмосферного ослаблення у міліметровому діапазоні хвиль / М.В. Руженцев, О.С. Михайлов // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. – 2012. Том 11. № 1. – С. 91-94.**

Робота присвячена з'ясуванню рівня лігитимності моделей висотних метеорологічних профілей, що найбільше використовуються у Європі у різноманітних радіофізичних проблемах. Виявлено вплив регіональних та сезонних мінливостей на перевагу використання цих моделей що до розрахунку атмосферного ослаблення, опрацьовано шлях підвищення їх адекватності.

*Ключові слова:* атмосферне ослаблення, міліметровий діапазон, вертикальні профілі метеопараметрів.

Табл. 01. Іл.02. Бібліогр.: 08 найм.

UDC 537.876; 621.371.38

**On necessity of taking into account of microclimatic features at forecasting vertical atmospheric attenuation in a millimeter wave band / N.V. Ruzhentsev, A.S. Mihailov // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. – 2012. Vol. 11. № 1. – P. 91-94.**

The paper is devoted to considering the legitimacy level of using models of meteorological vertical profiles which are most commonly used in Europe in various radiophysical applications. Influence of regional and seasonal variability on the preference of these models usage is estimated, the most effective of them for calculations of atmospheric absorption are defined and the way of increasing their adequacy is shown.

*Keywords:* atmosphere attenuation, millimeter waves, vertical profiles of meteorological data.

Tab. 01. Fig. 02. Ref.: 08 items.