

### Мониторинг тропосферной рефракции с использованием излучений телевизионных центров на загоризонтной трассе

В.И. Луценко<sup>1</sup>, И.В. Луценко<sup>1</sup>, И.В. Попов<sup>1</sup>, Н.С. Ань (Nguyen Xuan Anh)<sup>2</sup>, Цзьян Гуо (Qiang Guo)<sup>3</sup>, Юн Джин (Yu Zheng)<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Институт радиофизики и электроники им. А.Я.Усикова НАН Украины, 61085, Харьков, Ак. Проскуры, 12, e-mail: [lutsenko@ire.kharkov.ua](mailto:lutsenko@ire.kharkov.ua)

<sup>2</sup>Vietnam Academy of Science and Technology, Vietnam, F8, 18 Hoang Quoc Viet Str., Cau Giay Dist., Hanoi, Vietnam

<sup>3</sup>College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, P.R. of China, Rd. Nantong 145, Harbin, Prov. Heilongjiang, P.R. of China, e-mail: [guoqiang@hrbeu.edu.cn](mailto:guoqiang@hrbeu.edu.cn)

<sup>4</sup>School of Electronics and Information Engineering of Qingdao University, P.R. of China, Rd. Ningxia 308, Qingdao, Prov. Shandong, P.R. of China, e-mail: [cucecc@mail.ru](mailto:cucecc@mail.ru)

*Рассматривается методика изучения тропосферной рефракции по амплитуде и углам прихода сигналов УКВ на загоризонтной трассе. Описан измерительный комплекс и приведены предварительные результаты изучения рефракционных свойств тропосферы по сигналам телевизионных центров.*

*The technique of studying tropospheric refraction by the amplitude and angles of the arrival of VHF signals on the over-horizon path is considered. A measuring complex is described and preliminary results of studying the refractive properties of the troposphere are given by signals from television centers.*

#### Введение

Работы А.И. Калинина [1,2] послужили теоретической основой для исследования рефракционных свойств тропосферы по множителю ослабления сигнала УКВ на загоризонтных трассах [3-5]. Настоящая работа является их продолжением. В ней предлагается измерять множитель ослабления в пространственно разнесенных по высоте точках пространства и использовать в качестве дополнительного информационного канала для оценки рефракции угол прихода волны, измеряемый по ее фазовому фронту.

#### 1. Методика измерений

При выборе трасс исходили из необходимости охвата исследованиями обеих зон распространения радиоволн (дифракционной и дальнего тропосферного распространения). Для этой цели были выбраны 3 трассы, основные характеристики которых приведены в табл. 1.

**Таблица 1. Основные характеристики измерительных каналов.**

№ трассы	Место расположения передающего пункта	Длина трассы, км	Частота, МГц	Мощность передатчика, кВт	Высота установки передающей антенны, м	Коэффициент усиления передающей антенны, дБ	Радиус I зоны Френеля, м
1	Белгород	71	175	5,0	175	10	348
1	Белгород	71	223	5,0	175	10	308
1	Белгород	71	519	1,0	190	5,5	202
2	Курск	193	191	5,0	250	10	548
3	Красногоровка, Полтавская обл.	207	207	40,0	203	10	513

Приемный пункт располагался в г. Харькове. Высота размещения центра двух антенн составляла 30,7 м относительно поверхности Земли, и 207,2 м относительно уровня моря. Расстояние между нижней и верхней антеннами (база) составляло около 10 м примерно 15...20 длин волн в зависимости от номера телевизионного канала ДМВ. Трасса №1 (Белгород - Харьков) охватывала переходную область полутени-тени, в то время, как трассы №2, №3 (Курск - Харьков и Красногоровка - Харьков) охватывали область глубокой тени, где доминирующей при распространении радиоволн является рассеяние на неоднородностях тропосферы. Трассы №2 и №3 имели примерно одинаковую длину и взаимно ортогональную ориентацию (угол около 90 градусов).

Такая ориентация трасс обеспечивала возможность анализа влияния направления перемещения воздушных масс относительно трассы распространения на множитель ослабления ЭМ поля за горизонтом. Для исследований использовались сигналы, изучаемые телевизионными центрами.

### 1.1. Оценка рефракционных свойств тропосферы по множителю ослабления поля УКВ за горизонтом

Можно применить упрощенную методику приближенных оценок напряженности поля в зонах тени и полутени, рассматриваемую в работе А. И. Калинина [1], которая позволяет получить ошибки в расчетах множителя ослабления для диапазона УКВ не больше 2 дБ.

Из теории дифракции известно, что зависимость множителя ослабления от дистанции в зоне тени имеет примерно экспоненциальный характер, причем скорость убывания зависит от длины волны и рефракции, которую учитывают через эквивалентный радиус Земли, поляризации излучения и приема, а также проводимости и диэлектрической проницаемости земной поверхности. Наиболее часто для определения напряженности поля, а значит и множителя ослабления в области тени, с учетом параметров подстилающей поверхности, используют метод Введенского, впервые изложенный в [6]. В диапазоне УКВ во всех случаях, кроме длин волн  $> 2$  м, и излучении / приеме вертикально поляризованной волны над морем, значение параметра, определяющего влияние на множитель ослабления характеристик почвы, можно принять без большой ошибки равным 54,5 (предельное значение). При этом напряженность поля не зависит от электрических параметров поверхности и поляризации.

Расчеты позволили установить, что в диапазоне УКВ при не слишком ли малых высотах расположения антенн экспоненциальный характер зависимости множителя ослабления характерен не только для зоны тени, но и для зоны к радиогоризонту. Удовлетворительную оценку в этих областях дает соотношение [1]:

$$V[\text{дБ}] = V_0[\text{дБ}] - 17,1\sqrt{Y_1} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{m}}\right)(\xi - 1), \quad (1)$$

где  $\xi = \frac{R}{R_{\text{пр}}}$ ,

$V_0[\text{дБ}]$  - множитель ослабления ЭМ поля на дальности прямой видимости:

$$x_{\text{пр}} = \frac{R_{\text{пр}}}{R_0} = \frac{\sqrt{2a_0}(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})}{R_0} = \sqrt{Y_1} + \sqrt{Y_2}. \quad (2)$$

Следует отметить, что погрешность вычисления множителя ослабления менее 2 дБ достигается при  $x_{\text{пр}} \gg 0,5$ .

Для аналитических расчетов получена их полиномиальная аппроксимация вида:

$$V_0(\mu) = \sum_{i=0}^n A_i \mu^i, \quad (3)$$

где  $A_i$  - коэффициенты аппроксимирующего полинома.

Получаемые ошибки аппроксимации приведены в табл. 2. В ней использованы следующие обозначения:  $R$  - коэффициент корреляции;  $\sigma$  - остаточная ошибка аппроксимации;  $N$  - количество точек.

**Таблица 2. Ошибки зависимости  $V_0$  от  $\mu$ .**

Порядок регрессии, $n$	$R$	$\sigma$	$N$
2	0,984	2,07	13
3	0,998	0,68	13
4	0,999	0,59	13
5	0,9993	0,52	13
6	0,9994	0,51	13

На основании их анализа с использованием критерия Фишера [7] для дальнейших расчетов был выбран полином с  $n = 5$ .

Погрешности оценки значения множителя ослабления не более 2 дБ при ошибках в измерении длины трассы и высоты корреспондирующих пунктов не более 15%.

Для рассчитанных зависимостей множителя ослабления  $V$  (г) от градиента индекса рефракции  $g$  путем их аппроксимации методом наименьших квадратов (МНК) была решена обратная задача и полученные зависимость градиента индекса рефракции  $g$  ( $V$ ) [ $N$  ед./м<sup>-1</sup>] от значений множителя ослабления [дБ] [3- 5]:

$$g(V) = \sum_{i=0}^n A_i V_i^n \quad (4)$$

Значения коэффициентов полиномиальной аппроксимации, а также полученные при этом коэффициенты корреляции  $R$  и остаточные ошибки  $\sigma$  для трасс Белгород-Харьков; Курск-Харьков; Красногоровка-Харьков проанализированы с использованием критерия Фишера и для дальнейших расчетов использовался полином с  $n = 5$ . Окончательное выражение имеет вид

$$g = A_0 + A_1 * V + A_2 * V^2 + A_3 * V^3 + A_4 * V^4 + A_5 * V^5. \quad (5)$$

Результирующие коэффициенты аппроксимации для всех трасс представлены в табл. 3.

**Таблица 3. Коэффициенты полиномиальной аппроксимации зависимости градиента коэффициента преломления от множителя ослабления для различных трасс и каналов.**

Канал	Коэффициенты полинома					
	$A_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$
6 канал, Белгород	-0,6971	-0,1553	-0,0161	-8,4183E-4	-2,1142E-5	-2,0528E-7
12 канал, Белгород	-0,2728	-0,050	-0,0056	-3,3815E-4	-9,5946E-6	-1,0337E-7
27 канал, Белгород	-0,0950	-0,0049	-1,2439E-4	-1,7184E-5	-7,6191E-7	-1,114E-8
8 канал, Курск	-0,1665	-0,0011	2,0494E-6	-2,5501E-8	-1,7766E-10	-4,0129E-13
8 канал, Красногоровка	-0,17223	-0,0012	1,5458E-6	-4,4114E-8	-3,0493E-10	-7,1303E-13
10 канал, Красногоровка	-0,16853	-0,0012	1,2248E-6	-4,492E-8	-3,1157E-10	-7,3860E-13

Следует отметить, что в ней приведены параметры полиномиальной аппроксимации, которые являются лучшими с точки зрения критерия Фишера. Полученные соотношения позволяют оценить значение эффективного градиента индекса рефракции, по экспериментально полученным значениям множителя ослабления поля, которые могут быть сопоставлены с данными метеорологических измерений.

## 1.2. Определение рефракционных свойств тропосферы с использованием угла прихода излучения телевизионного центра

Вследствие преломления радиоволн в земной атмосфере угол выхода волны с точки передачи и угол прихода волны в точку приема меняются во времени случайным образом из-за временных изменений зависимости  $\epsilon(h)$ . Эти изменения приводят к ошибкам в определении угловых координат источников излучений, установленных, например, на ИСЗ, и определяют предельно малую ширину диаграмм направленности передающей и приемной антенн на наземных радиорелейных линиях.

Угол выхода волны с точки передачи и угол ее прихода в точку приема  $\delta$  (рис. 1) могут быть определены в предположении, что траектория волны является дуга окружности, проходящей через точки передачи и приема, характеризующееся радиусом  $\rho$ .

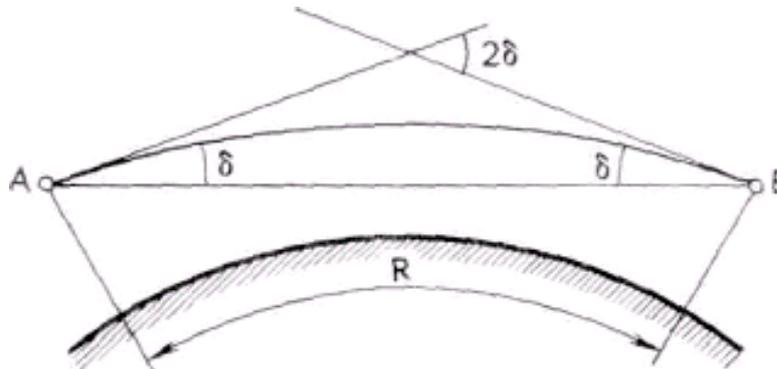


Рис. 1. Углы рефракции  $\delta$  при одинаковых высотах антенн.

Так как расстояние  $R$  между точками передачи и приема много меньше  $\rho$ , то значения углов  $\delta$  [2]:

$$\delta = \frac{R}{2\rho} = -\frac{Rg}{4}, \quad (6)$$

где  $g$  - приземное значение вертикального градиента коэффициента преломления воздуха.

Отрицательным значением  $g$  соответствуют положительные значения  $\delta$ , положительным  $g$ -негативные значения  $\delta$ ;  $\delta$  выражено в радианах.

Статистическое распределение значений  $g$  подчиняется нормальному закону со средним значением и стандартным отклонением  $\sigma_g$ . Поэтому статистическое распределение значений углов  $\delta$  также будет нормальным со средним значением:

$$\bar{\delta} = -\frac{R\bar{g}}{4} \quad (7)$$

и величиной стандартного отклонения:

$$\sigma_\delta = \frac{R\sigma_g}{4}. \quad (8)$$

При обычных значениях  $\bar{g} = -(8 \dots 10) 10^{-8}$  (1 / м) и  $\sigma_g = (8 \dots 10) 10^{-8}$  (1 / м) и дальностях  $R = 100$  км  $= \sigma_\delta = (2 \dots 2 \dots 2,5) 10^{-3}$  рад (примерно 0,12-0, 15 °). Однако в течение малых процентов времени вариации углов  $\delta$  могут быть достаточно большими.

Таким образом, измеряя углы прихода электромагнитной волны источника, находящегося на фиксированной высоте в вертикальной плоскости каждым из известных методов можно по ним судить (7) о рефракционные свойства тропосферы.

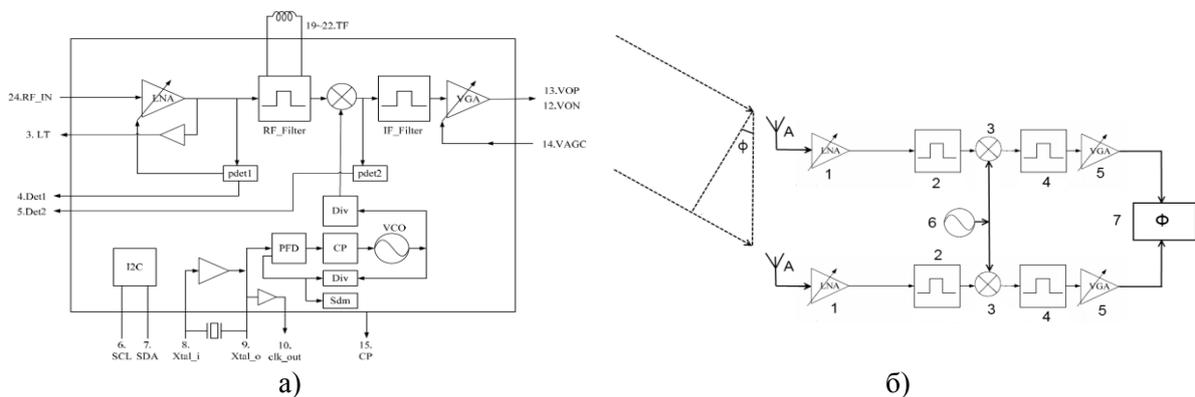
Пеленгационная чувствительность будет тем выше, чем больше отношение базы системы к длине волны. Следовательно, для увеличения точности измерения угла стоит увеличивать длину базы по отношению к длине волны.

Подобный подход можно пробовать использовать для оценки рефракционных свойств тропосферы и при загоризонтном распространении УКВ.

## 2. Измерительный комплекс для приема УКВ сигналов на загоризонтной трассе

Измерительный комплекс должен обеспечивать возможность измерения уровня сигналов на пространственно разнесенных антеннах в полосе частот телевизионных сигналов, а также измерение улов прихода сигнала, т.е. наклона фазового фронта, приходящей на приемники электромагнитной волны. В качестве приемного устройства использовалась многофункциональная микросхема R820T, представляющая собой приемник с высокой степенью интеграции. В ее состав входят: малошумящий усилитель (LNA), смеситель, фильтры ВЧ и ПЧ, системы фазовой автоподстройки частоты (PLL), выходной усилитель с переменным коэффициентом усиления (VGA), стабилизатор напряжения, следящий фильтр, при этом исключается необходимость в применении внешних ЮАР фильтров, МШУ, согласующих трансформаторов и стабилизаторов.

Структурная схема одного канала приемника приведена на рис.1 а, а его двухканальный вариант показан на рис. 1б.



**Рис.2. Структурная схема одноканального (а) и двухканального (б) для измерения углов прихода с общим гетеродином приемников на базе микросхемы R820T: А - приемная антенна, 1 - малошумящий усилитель ВЧ сигнала, 2 - фильтр ВЧ, 3 - смеситель, 4 - фильтр ПЧ, 5 - управляемый усилитель ПЧ сигнала, 6 - генератор, управляемый напряжением (ГУН), 7 - измеритель разности фаз.**

Данный измерительный комплекс представляет собой программно-определяемую радиосистему (Software-defined radio, SDR) где радиоприемник, который использует технологию, позволяющую с помощью программного обеспечения устанавливать или изменять рабочие радиочастотные параметры, включая, в частности, диапазон частот, ширину полосы тип демодуляции. Значительная часть цифровой обработки сигналов выполняется на персональном компьютере. Предложенная схема является радиоприемником, изменяемым путем программного изменения конфигурации, что позволяет обслуживать большое количество радиопrotocolов. Измерительный комплекс состоит из супергетеродинного приемника, который преобразует сигнал с радиочастоты на промежуточную частоту, а также аналого-цифрового и цифро-

аналоговых преобразователей (АЦП и ЦАП). Основные технические характеристики комплекса приведены в табл.4.

**Таблица 4. Основные параметры приемника.**

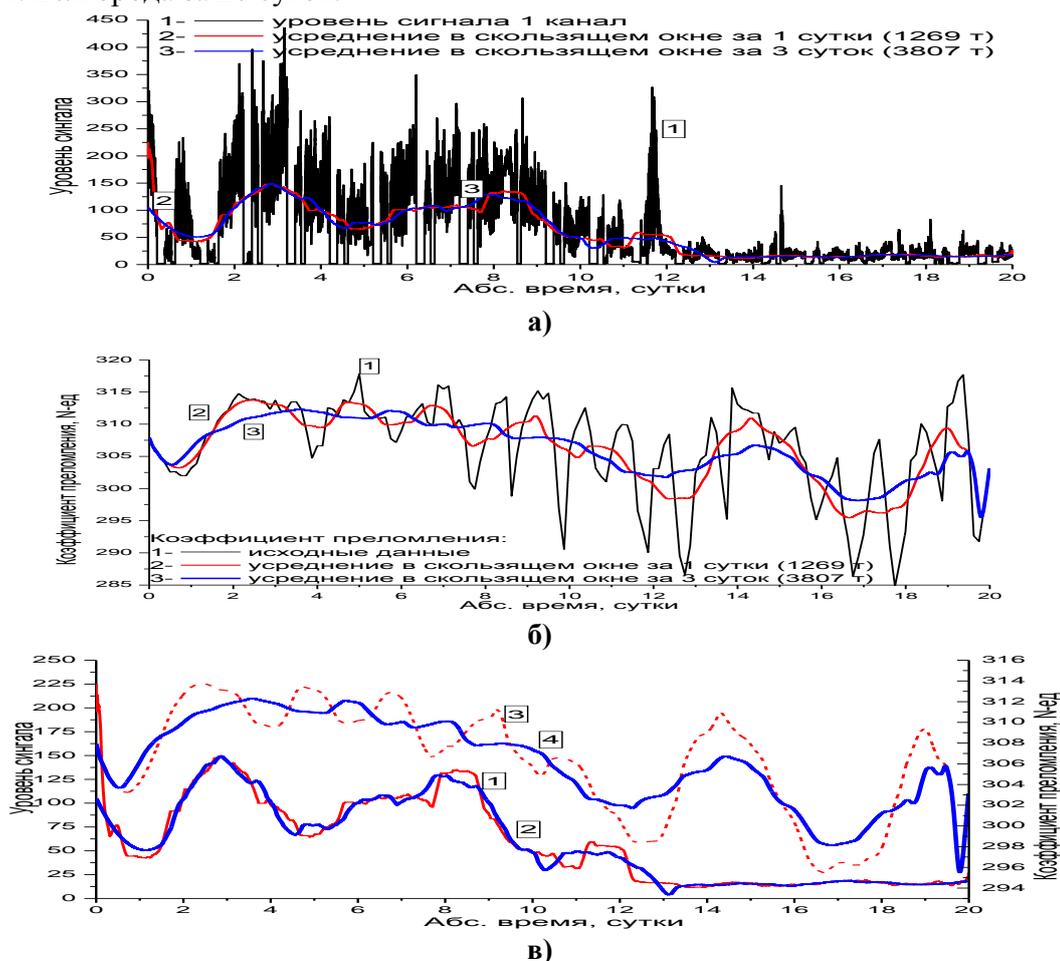
Диапазон рабочих частот	42 - 1002 МГц
Коэффициент шума	3.5 дБ
Уровень фазовых шумов	-98 дБм / Гц @ 10 кГц
Потребляемый ток, напряжение	<178 мА @ 3.3В
Максимальная мощность на входе	+10 дБмВт
Подавление помех по зеркальному каналу	65 дБмВт

**Таблица 5. Используемые в эксперименте ДМВ передающие каналы ТЦ г. Белгорода.**

	1	2	3
Частота несущей изображения, МГц	655,25	615,25	471,25
Высота антенны над уровнем Земли, м	146	128	120
Мощность передатчика, Вт	500	1000	500

### 3. Результаты эксперимента

В качестве примера на рис.3 приведены записи сигналов ДМВ телевизионного центра г. Белгорода за 20 суток.



**Рис.3. Изменения уровней сигналов 21 канала телецентра г. Белгорода, частота 655МГц с 28.03.18-17.04.18г.г. и коэффициентов преломления: а- сигнал верхнего канала исходный и с усреднением за 1 и 3 суток; б- коэффициент преломления снятый с интервалом 3 часа и усредненный за 1 и 3 суток; в- исходный.**

Для сигнала характерна цикличность, связанная с суточным характером поведения сигнала. Кроме того следует отметить, что кроме внутрисуточных изменений наблюдаются и трендовые более медленные изменения. Так на начальном этапе измерений (с 28.03 примерно до 08.04) средний уровень сигнала существенно, примерно в 6...7 раз выше, чем во втором периоде измерений. Увеличение интервала сглаживания приводит к возрастанию коэффициента корреляции принятого сигнала и коэффициента преломления. Изменение интервала сглаживания от 3 часов до 3 суток приводит к изменению коэффициента корреляции от 0.35 до 0,8.

#### **4. Заключение**

1. Создан двухканальный аппаратный комплекс и методики мониторинга тропосферной рефракции по множителям ослабления сигналов телевизионных центров на загоризонтных трассах и углам прихода. Для оценки тропосферной рефракции предложено использовать изменения множителя ослабления и углов прихода при загоризонтном распространении УКВ сигналов телевизионных центров. Возрастание эффективного градиента коэффициента преломления приводит к увеличению уровня сигнала, принимаемого за горизонтом, а снижение – к его уменьшению. Характерны суточные колебания уровней принимаемых сигналов, связанные с суточным ходом изменения эффективного градиента коэффициента преломления.

2. Уровни сигналов, принимаемых на нижнюю антенну существенно ниже, чем на верхнюю. Несмотря на то, что разнос антенн не превышает ширины интерференционного лепестка поля, принимаемые на разнесенные антенны сигналы как в пределах одного частотного канала. так и разных каналов слабо коррелированы.

3. Трендовые изменения сигнала коррелированы с коэффициентом преломления на трассе существенно сильнее, чем их флуктуационные изменения. Это означает, что трендовые изменения уровня сигнала на загоризонтной трассе могут использоваться для прогнозирования значений коэффициента преломления в пограничном слое тропосферы.

#### **Литература**

1. Калинин А. И. К расчету напряженности поля в зонах тени и полутени при распространении ультракоротких волн вдоль гладкой сферической поверхности земли / А. И. Калинин // Радиотехника.– 1956.– Т. 11, № 6.– С. 43–49.
2. Калинин А. И. Распространение радиоволн на трассах наземных и космических радиолиний / А. И. Калинин.– М.: Связь, 1976.– 296 с.
3. Оценка тропосферной рефракции по множителю ослабления радиоволн при распространении на приземных загоризонтных трассах / Е. Н. Белов, В. И. Луценко, И. В. Луценко, С. И. Хоменко // Радиофизика и электроника: Сборник научных трудов / НАН Украины. Ин-т радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова. – Харьков. – 2004. – Т. 9, № 1. – С. 248-258.
4. Belov Ye. N. The Troposphere Refraction Estimation by Attenuation Factor of Radiowave Beyond- the- Horizon Propagation / Ye. N. Belov, I. V. Lutsenko, V. I. Lutsenko, S. I. Khomenko // Telecommunication and Radio Engineering.– 2003.– V. 60, № 10, 11&12.– P. 1-14.
5. Диагностика рефракции тропосферы по множителю ослабления поля метровых волн в зоне тени/ В. И. Луценко, Е. Н. Белов, И. В. Луценко, С. И Хоменко // Вісник Харківського національного університету ім. В. М. Каразіна, Серія «Радіофізика та електроніка».– 2002.– № 570.– С. 208-209.

6. Введенский Б. А. Распространение ультракоротких радиоволн / Б. А. Введенский, А. Г. Аренберг.– М.: Гос. изд. литературы по вопросам связи и радио, 1938.– 274 с.
7. Львовский Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул: Учеб пособие / Е.Н. Львовский.– М.: Высш. школа.– 1982.– 224 с.