

**В. Б. Замараев, В. Б. Синицкий***Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины**12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина*E-mail: [vs@ire.kharkov.ua](mailto:vs@ire.kharkov.ua)**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТРОПОСФЕРНОЙ РЕФРАКЦИИ В ЗОНЕ ТЕНИ  
ПО ИЗЛУЧЕНИЮ УДАЛЕННОГО ИСТОЧНИКА****Часть 1. Модель**

Оценка тропосферной рефракции по сигналам искусственных спутников Земли (ИСЗ) является актуальной задачей, так как относится к практически важной проблеме краткосрочной диагностики условий распространения радиоволн. Статья посвящена разработке модели, имитирующей заход ИСЗ в области геометрической тени, в которой эффекты тропосферной рефракции максимальны. Модель использует численные расчеты, основанные на дифракционных и геометрооптических построениях. Так как в случае с удаленным источником концепция эквивалентного радиуса Земли неприменима, расчеты проведены для Земли натурального радиуса. Результаты расчетов множителя ослабления в области геометрической тени, выполненных по дифракционной теории для виртуального источника, трансформируются на горизонт реального удаленного источника с помощью геометрооптической модели для слоисто-стратифицированной атмосферы. Используется принцип, устанавливающий равенство множителей ослабления на трассах с общим загоризонтным участком. Расчеты множителя ослабления произведены для набора линейно-экспоненциальных профилей коэффициента преломления тропосферы при разных приземных значениях и различных градиентах (от стандартной до почти критической рефракции). Полученные характеристики могут быть использованы для решения обратной задачи рефракции – восстановления градиента коэффициента преломления приводного слоя тропосферы. Показано, что информативными параметрами для оценки рефракции являются угол радиозахода и крутизна дифракционного участка множителя ослабления. Ил. 5. Библиогр.: 22 назв.

**Ключевые слова:** тропосферная рефракция, зона тени, удаленный источник, множитель ослабления.

В исследованиях тропосферной радио-рефракции важную роль играют дистанционные методы, в том числе использующие излучение навигационных искусственных спутников Земли (ИСЗ) (GPS, ГЛОНАСС и др). При этом применяется либо радиозатменный метод [1], когда приемник располагается в космосе, либо различные схемы наземных измерений [2–6]. В ряде практических приложений представляет интерес случай, когда прием сигналов ИСЗ вблизи поверхности Земли производится под малыми углами к горизонту, при этом рефракционные эффекты максимальны [3, 5, 6]. Это же реализуется при радиозаходах [7] ИСЗ, когда некоторую часть времени после прохождения радиогоризонта сигнал принимается в области геометрической тени, т. е. в области, соответствующей дальнему тропосферному распространению (ДТР). Преобладающее большинство работ, посвященных ДТР, выполнено на внутритропосферных трассах [8, 9]. Их результаты могут быть частично использованы при интерпретации данных спутниковых измерений. Вместе с тем некоторые вопросы, связанные с большим удалением источника излучения, требуют более детального рассмотрения.

Известно, что поле в зоне тени формируется в результате воздействия нескольких механизмов: дифракции, рассеяния на турбулентных неоднородностях тропосферы, отражения от слоев. В данной работе используется численная полуэмпирическая модель, имитирующая рефракционные эффекты в зоне геометрической тени, основанная на дифракционном механизме распро-

странения радиоволн, при наличии удаленного источника. Целью работы является исследование возможности параметрического восстановления градиента коэффициента преломления приводного слоя тропосферы по данным спутниковых измерений.

**1. Постановка задачи.** Рассматривается распространение радиоволн над гладкой Землей, окруженной сферически стратифицированной атмосферой, коэффициент преломления которой является функцией только высоты,  $n = n(h)$ . Приемник расположен на сравнительно небольшой высоте  $h_1$  над поверхностью, не превышающей нескольких десятков метров (точка  $A$  на рис. 1, а), излучатель находится за пределами атмосферы (точки  $B$  и  $C$ , соответствующие различным положениям ИСЗ – в зоне прямой видимости и на линии горизонта).

Через  $\delta_1$  и  $\delta_2$  обозначены углы рефракции для трасс  $AB$  и  $AC$ . По определению [10], угол истинной рефракции  $\delta$  (при условии пренебрежения фотограмметрическим углом  $\Delta_\phi$  в случае удаленного источника) равен разности между соответствующим кажущимся и истинным углом

$$\delta = \alpha_k - \alpha_n. \quad (1)$$

Общепринятая схема расчета множителя ослабления и угловых характеристик в зоне тени, основанная на концепции эквивалентного радиуса Земли  $a_e$ , [11–14], позволяющей значительно упростить решение задачи в случае внутритро-

сферного расположения источника и приемника путем спрямления соединяющих их лучей, в большей части нашего расчета не подходит. Известно, что для применения концепции  $a_3$  необходимо выполнение двух условий:

- высоты приемника и источника должны быть меньше радиуса Земли  $a = 6\,371$  км;
- $n(h)$  должна быть линейной функцией высоты.

В нашем случае оба условия нарушены, так как, во-первых, высота спутника GPS над поверхностью около 20 000 км, во-вторых, зависимость  $n(h)$  в реальной атмосфере в среднем близка к экспоненциальной [10, 15]

$$n(h) = 1 + \Delta n_0 \exp\left(\frac{g_n h}{\Delta n_0}\right), \quad (2)$$

где  $\Delta n_0 = n_0 - 1$ ;  $n_0$  – приземное значение  $n(h)$ ;  $g_n$  – градиент. Поэтому будет использоваться натуральная схема с истинным радиусом Земли  $a$ , что требует расчета лучей, соединяющих  $A$  и  $B$  (или  $A$  и  $C$ ) по криволинейным траекториям. Одна из таких траекторий  $AC$ , касающаяся поверхности в точке  $D$  (рис. 1, а), является линией горизонта, разделяющей пространство на две зоны: освещенную зону и зону тени (по аналогии с расчетом по модели  $a_3$ , где линия горизонта – прямая линия, рис. 1, б).

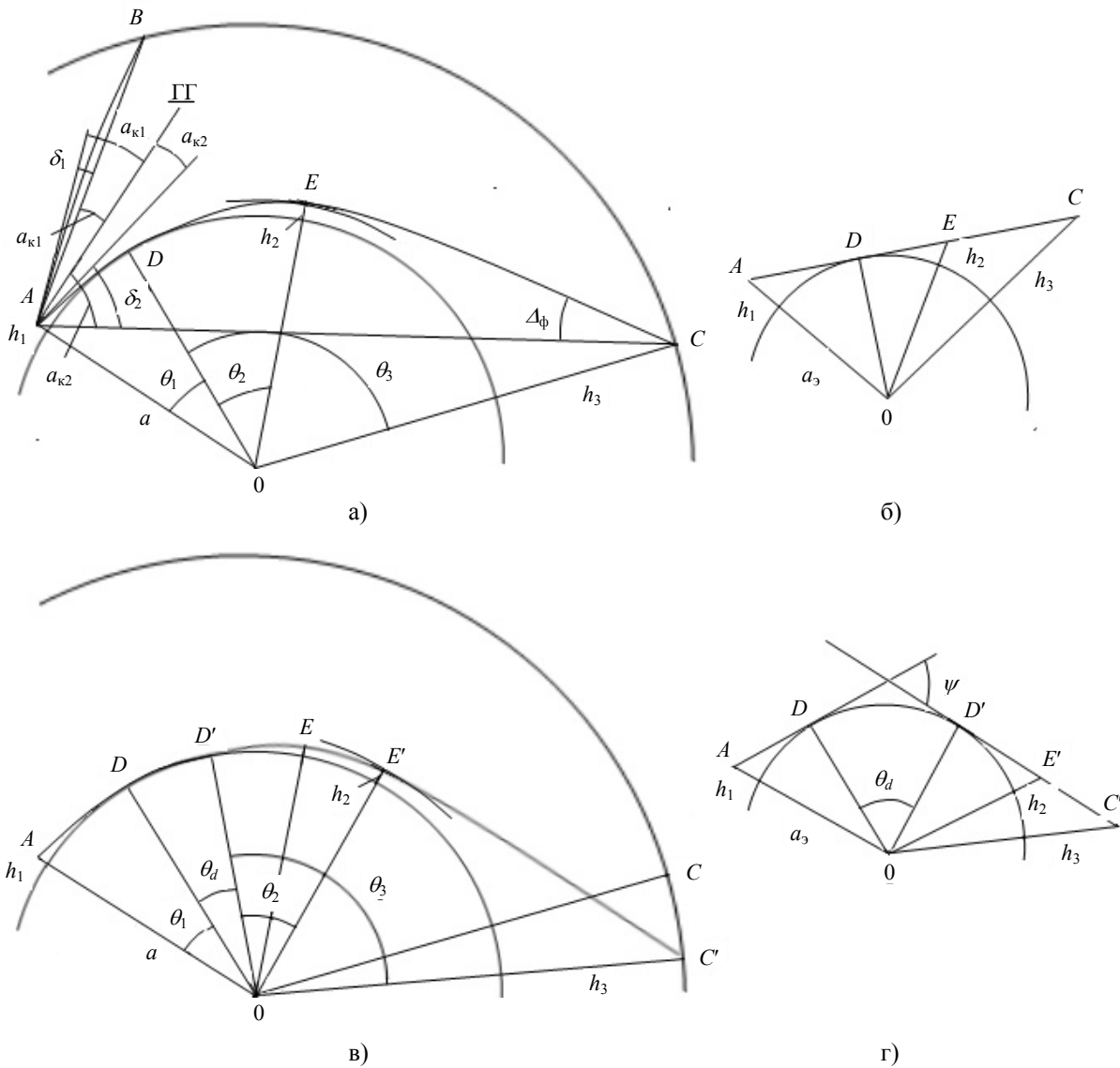


Рис. 1. Схема прохождения лучей через атмосферу к приемнику  $A$ : а) – касательный луч при внеатмосферном реальном источнике  $C$  или виртуальном внутриатмосферном источнике  $E$ ; б) – касательный луч при внутриатмосферном расположении корреспондирующих пунктов и концепции эквивалентного радиуса Земли; в) – то же, что на рис. 1, а, при смещении источников  $C, E$  на угол  $\theta_d$ ; г) – то же, что на рис. 1, б, при смещении источников на угол  $\theta_d$  и образовании угла дифракции  $\psi$ ;  $\Gamma\Gamma$  – геометрический горизонт

Общее решение для множителя ослабления в функции центрального угла  $\theta$  в случае удаленного источника конструируется подобно тому, как это сделано для внутритропосферных трасс: в освещенной зоне множитель ослабления  $V$  находится по интерференционным формулам, в зоне тени – по дифракционным, результаты расчета смыкаются на линии горизонта [11, 12].

Дальнейшее движение источника (рис. 1, в) приводит к смещению  $C$ ,  $D$  и  $E$  на одинаковый угол  $\theta_d$ , в положение  $C'$ ,  $D'$  и  $E'$ , и к образованию вместо точки  $D$  двух точек касания  $D$  и  $D'$ : для луча, выходящего из приемной антенны, и луча, идущего от источника, что аналогично ситуации на внутритропосферных трассах (рис. 1, г). Угол дифракции  $\psi$  между этими лучами и равный ему центральный угол  $\theta_d$  между  $D$  и  $D'$  являются важными параметрами для расчета множителя ослабления в зоне тени. Это следует из теории [11, 12, 16], поскольку при определенных условиях (большие высоты, диапазон СВЧ) множитель ослабления зависит от безразмерного параметра  $\xi = (ka/2)^{1/3}\psi$  ( $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число,  $\lambda$  – длина волны), который является мерой погружения в тень и связан с углом дифракции  $\psi$ .

На основе этого в работе [17] предложен метод прогнозирования уровней сигналов ДТР, который предполагает равенство множителей ослабления на трассах, имеющих одинаковое «угловое расстояние» (*angular distance*,  $\theta_d$ ), т. е. общий загоризонтный участок. Следовательно, множитель ослабления в точке приема  $A$  остается постоянным при перемещении источника по линии  $D'E'C'$  – на трассе  $AC'$  должен быть таким же, как на трассе  $AE'$  (рис. 1, в, г). Для доказательства в статье [17] приведен экспериментальный график, иллюстрирующий зависимость множителя ослабления от протяженности загоризонтного участка на основании данных, собранных на 122 стационарных трассах. Результаты работы, упоминаемой как «первый полуэмпирический метод расчета функции ослабления на загоризонтных трассах» [8], а ее экспериментальный график – как «кривая прогнозирования» [9], обсуждались в научной среде и проверялись экспериментально, в том числе на трассах переменной конфигурации. Так, в работе [18], где авторы от «углового расстояния» переходят к «эффективным расстояниям» (умножением центрального угла  $\theta_d$  на эквивалентный радиус Земли  $a_s$ ), идея проверена с помощью двух самолетов, летевших одновременно на высотах 1 и 10 км и сохранявших взаимное положение на одном луче. Аналогичные опыты, но с одним самолетом, летавшим

попеременно на разных высотах над морем, для проверки идеи «совпадения множителей ослабления на трассах, имеющих общий загоризонтный участок», и теоретические расчеты для некоторых аномальных ситуаций изложены в монографии [19]. Эксперименты в работах [17–19] были выполнены для трасс, у которых высоты излучателя и приемника меньше радиуса Земли, т. е. при внутритропосферном расположении корреспондирующих пунктов.

В нашей работе применим идею [17] к трассам сильно отличающейся протяженности, расположенным на одном луче. У одной из трасс источник (реальный) вынесен за пределы атмосферы (трасса  $AC$ , рис. 1, в) а у другой источник (виртуальный) расположен внутри атмосферы (трасса  $AE$ ). При условии, что угол  $\theta_d$  мал, можно считать, что множитель ослабления в теневой зоне, создаваемый реальным источником  $C$  такой же, как и создаваемый виртуальным источником  $E$ , в соответствии с идеей [17] (предполагается отсутствие поглощения в атмосфере). Отличие нашей схемы расчета в том, что множители ослабления сопоставляются для точек, расположенных на криволинейных лучах, а не на прямых, как это было в [17–19].

Следовательно, искомую зависимость множителя ослабления  $V_{AC}$  можно приравнять к зависимости множителя ослабления  $V_{AE}$ , которая в свою очередь рассчитывается по дифракционным формулам [11–14]

$$V_{AC}(\theta_1 + \theta_3 + \theta_d) = V_{AE}(\theta_1 + \theta_2 + \theta_d). \quad (3)$$

Центральные углы  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$  и  $\theta_d$  видны на рис. 1, в. Внутритропосферные углы  $\theta_1 = r_{g1}/a$  и  $\theta_2 = r_{g2}/a$  вычисляются через расстояния горизонта приемника  $r_{g1}$  (т.  $A$ ), и горизонта виртуального источника  $r_{g2}$  (т.  $E$ ). Для расчета угла  $\theta_3$  используется изложенный ниже метод расчета лучевых траекторий.

Рассмотрим особенности расчета множителя ослабления в освещенной зоне и в зоне тени.

**2. Расчет лучей и углов рефракции в освещенной зоне.** Расчет производится по модели, основанной на известном методе [16, 20] пошагового расчета траектории лучей по формулам геометрической оптики в предположении о горизонтально-слоистой атмосфере с постоянным коэффициентом преломления  $n$  в пределах каждого концентрического слоя.

Так как в среде с постоянным  $n$  траектория луча является прямолинейной, в каждом элементарном слое она будет представлена отрезком прямой, а на всем интервале – в виде сложной

зависимости  $\theta(h)$  центрального угла  $\theta$  от высоты над поверхностью  $h$ . При этом на границе каждого слоя выполняется закон Снеллиуса  $n_j r_j \cos \alpha_j = n_0 r_0 \cos \alpha_0 = \text{const}$ , где  $r_j = a + h_j$ ;  $\alpha_j$  – угол места луча в данной точке. Полный центральный угол  $\theta_m$  равен сумме элементарных углов  $\theta_j$  («горизонт спутника») и на высоте орбиты  $h_3$  приобретает значение  $\theta_3$  (рис. 1, а, в). Полная электрическая длина траектории находится как сумма элементарных отрезков, вычисляемых в слоях, имеющих шаг  $\Delta h_j$ , с учетом значений  $n_j$  в каждом слое.

По приведенному алгоритму в работе [20] выполнены расчеты характеристик атмосферной рефракции для случаев абсолютно сухой и абсолютно влажной тропосферы, а также оценки вклада ионосферы в углы рефракции и удлинение пути. При расчетах весь интервал по высоте  $0 < h < 1\,000$  км разбивался на несколько подынтервалов, внутри каждого из которых задавалось свое значение шага по высоте  $\Delta h_j$ . Кроме того, луч, отраженный от поверхности, не учитывался.

В нашей работе создан адаптирующийся алгоритм, в основу которого положено изменение шага по высоте и угла выхода в зависимости от соотношения между параметрами луча и свойствами среды. Модель допускает задание произвольной зависимости  $N(h)$  (где  $N = 10^6(n-1)$  – приведенный коэффициент преломления, измеряемый в  $N$ -единицах). Для расчетов выбраны линейно-экспоненциальные профили (рис. 2) – линейный участок на интервале от приземного значения  $N_1$  при  $h=0$  до точки встречи с экспонентой, выше – зависимость  $N(h)$  – экспоненциальная (2), с параметрами, соответствующими стандартным условиям:  $g_{N0} = -0,04$   $N$ -ед./м,  $N_0 = 289$   $N$ -ед. [10].

Выбор такого типа профиля обеспечивает, во-первых, возможность расчета поля виртуального источника в теневой области по разработанным в [11–14] формулам для докритической рефракции при использовании концепции эквивалентного радиуса Земли и идеи работы [17]. Во-вторых, экспоненциальная часть профиля корректирует расчет для случая с удаленным источником. Используемый в работе набор профилей охватывает значения градиентов в нижнем линейном слое от стандартного  $g_N = -0,04$   $N$ -ед./м до близкого к критическому  $g_N = -0,15$   $N$ -ед./м (12 значений  $g_N$  через  $0,01$   $N$ -ед./м), при изменении приземных значений  $N_1$  от 300 до 390  $N$ -ед.

(10 значений через 10  $N$ -ед., точки на оси  $N$ , рис. 2). На рисунке выделен один из профилей, применяемый в конкретном расчете.

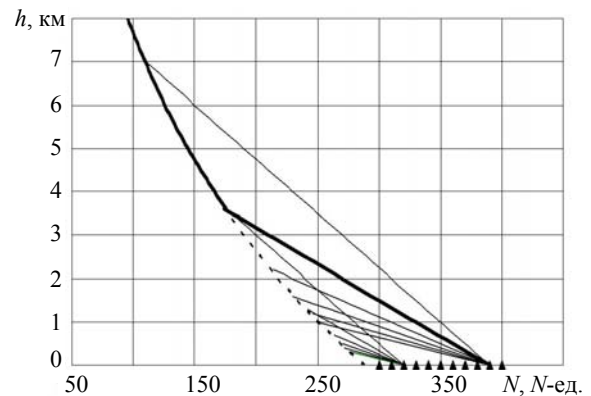


Рис. 2. Схема формирования набора линейно-экспоненциальных профилей  $N(h)$

В освещенной зоне по модели рассчитываются траектории и электрические длины прямого и отраженного от гладкой поверхности лучей. Для поиска отраженного луча применена итерационная процедура по углу выхода. Интерференционная структура множителя ослабления  $V = f(\alpha_n)$  рассчитывается в функции истинного угла места

$$\alpha_n = \arctg \left[ \frac{(a + h_3) \cos \theta_m - (a + h_1)}{(a + h_3) \sin \theta_m} \right], \quad (4)$$

связанного с высотой приемника  $h_1$  и полярными координатами спутника  $(a + h_3)$  и  $\theta_m$ .

Расчеты по рассматриваемой геометрооптической модели использовались ранее для интерпретации данных спутниковых измерений над морем [5], где исследовалась изменчивость угловых положений минимумов интерференционной структуры в каждом лепестке. Получено удовлетворительное соответствие диапазона вариаций измеренных и рассчитанных по описанной модели углов рефракции.

В ряде случаев интерес могут представлять зависимости углов рефракции  $\delta$  от параметров задачи при некоторых фиксированных значениях угла места. На рис. 3 показаны изменения  $\delta$  в функции градиента  $g_N$  и приземного значения  $N_1$  коэффициента преломления, рассчитанные для различных кажущихся углов места:  $\sim 0^\circ$  (касательный луч, рис. 3, а),  $0,38^\circ$  (первый интерференционный минимум при  $h_1 = 14,4$  м [5] (рис. 3, б) и  $3^\circ$  (рис. 3, в). Из расчетов следует, что при малых углах  $\sim (0 - 1^\circ)$   $\delta$  зависит как от  $g_N$ , так и от  $N_1$ . При дальнейшем увеличении угла места, кроме общего снижения диапазона вари-

ций углов рефракции, наблюдается также резкое уменьшение зависимости этих вариаций от градиента, остается только зависимость от  $N_1$  в соответствии с теоремой Лапласа [10, 21].

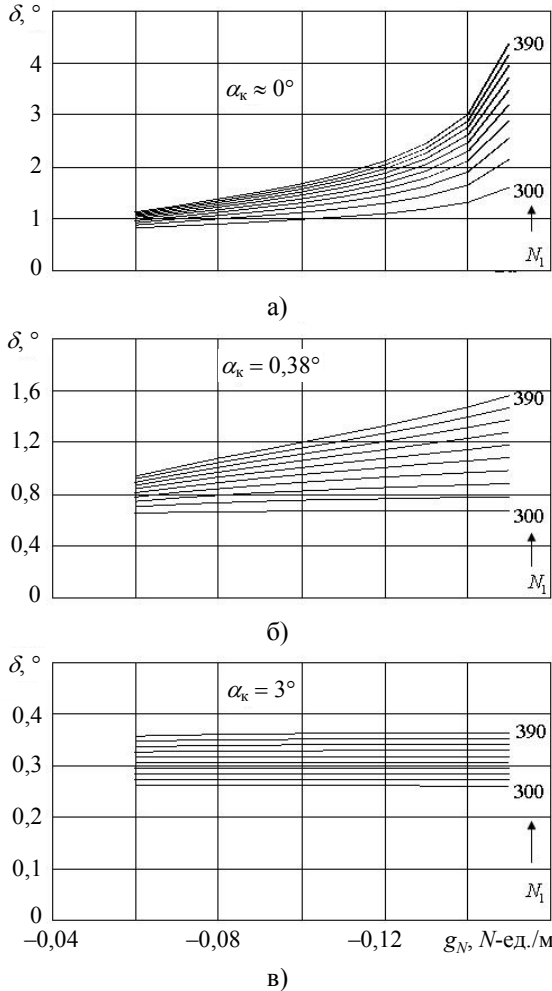


Рис. 3. Зависимость угла рефракции  $\delta$  от градиента  $g_N$  и приземного значения коэффициента преломления  $N_1$  для различных кажущихся углов места

**3. Оценка рефракции по множителю ослабления в зоне тени.** Для практических расчетов поля в зоне тени будем следовать разработанным по теории Фока [11] таблицам и графикам работ [12–14], где предлагается классификация вариантов расчета. Основными для выбора подходящего варианта являются значения приведенных высот  $y_1 = h_1 / H$ ,  $y_2 = h_2 / H$ , где  $h_1$  – высота приемника,  $h_2$  – высота (виртуального) излучателя,  $H = (a_3 \lambda^2 / 8\pi^2)^{1/3}$  – масштаб высоты.

Дальнейшие расчеты выполнены для длины волны  $\lambda = 19$  см (диапазон L1 навигационных спутников GPS). В случае наземных измерений тропосферной рефракции высота приемной антенны находится в пределах 10...50 м.

Масштаб высоты  $H$  при различных градиентах в приземном слое (от стандартного до почти критического) и указанной  $\lambda$  может меняться примерно от 15 до 30 м. Следовательно,  $y_1$  находится в пределах  $0,3 < y_1 < 3,5$ . Высота виртуального источника  $h_2$ , для которого производится расчет, выбирается в пределах линейного участка профиля  $N(h)$ , практически на уровне  $\sim 100...1000$  м, т. е.  $y_2 \gg 1$ .

Для такого сочетания параметров ( $y_1 \sim 1$ ,  $y_2 \gg 1$ ) и предельного случая параметра  $|q| = \infty$  (диапазон СВЧ, независимо от вида почвы и поляризации [12–14]) расчет множителя ослабления производится по формуле

$$|V(x, y_1, y_2, \infty)| = 4 \sqrt{\frac{x^2}{y_2}} |V_1(z, y_1, \infty)| \quad (5)$$

или в децибелах [10]

$$|V|_{\text{дБ}} = 10 \lg x - 5 \lg y_2 + |V_1(z, y_1, \infty)|_{\text{дБ}}, \quad (5a)$$

где  $x = R/L$  – приведенное расстояние;

$L = (a_3^2 \lambda / \pi)^{1/3}$  – масштаб расстояний;

$|V_1(z, y_1, \infty)|_{\text{дБ}}$  – множитель ослабления для плоской волны;  $z = x - \sqrt{y_2}$ .

На рис. 4 приведен график функции  $|V_1(z, y_1, \infty)|_{\text{дБ}}$ , пересчитанной в децибелы из табл. 17 работы [12]. Для нахождения  $V_1$  по заданным  $y_1$  и  $z$  воспользуемся линейностью зависимости  $V_1(z)$  при фиксированных  $y_1$ . Крутизна линий  $V_1(z)$  в зоне тени составляет в среднем – 17,6 дБ на одну  $z$ -единицу, при таком задании функции  $V_1(z)$  погрешность в зоне полутени может достигать 1,5...2 дБ [13].

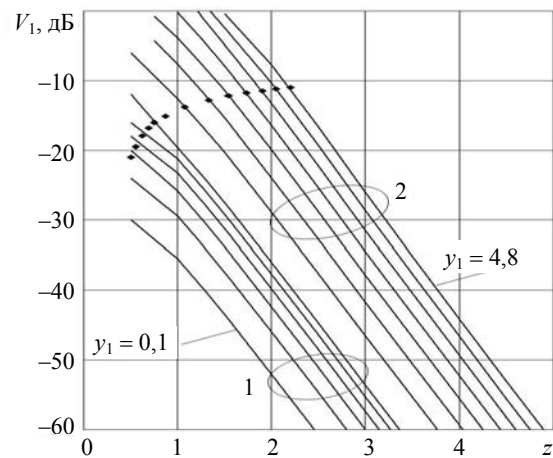


Рис. 4. Функция  $|V_1(z, y_1, \infty)|_{\text{дБ}}$  (множитель ослабления для плоской волны [12]); линии соответствуют табличным значениям параметра  $y_1$ : от 0,1 до 0,6 через 0,1 (группа 1) и от 1,2 до 4,8 через 0,6 (группа 2)

Практически функция  $|V_1(z, y_1, \infty)|_{\text{дБ}}$  вычисляется по формуле

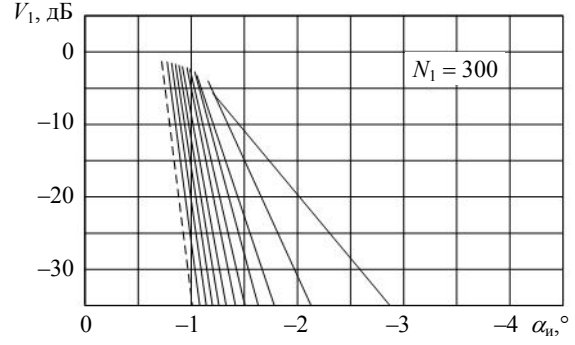
$$V_{1\text{дБ}} = V_{1(0\text{int})} - 17,6(z - z_{0\text{int}}), \quad (6)$$

где  $V_{1(0\text{int})}$  и  $z_{0\text{int}}$  находятся на линии горизонта интерполяцией между табличными значениями  $y_1$  (значки на рис. 4, перенесенные из рис. 24 книги [12]).

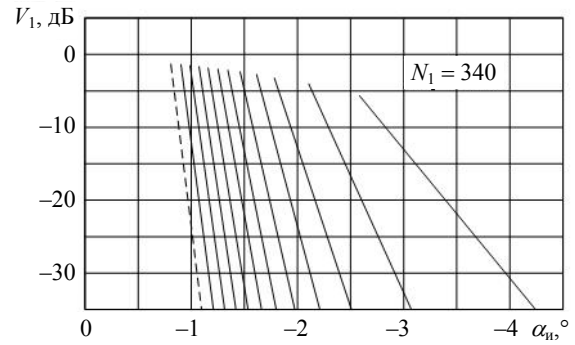
Полученные в процессе расчета по (5а) значения множителя ослабления  $V_{AE}(R)$  для трассы с виртуальным источником, используя переход  $\theta_d = R/a$ , пересчитываются в  $V_{AE}(\theta_1 + \theta_2 + \theta_d)$ , затем трансформируются в  $V_{AC}(\theta_1 + \theta_3 + \theta_d)$  по формуле (3) и попутно пересчитываются в  $V(\alpha_n)$ , в соответствии с формулой (4), а также сопрягаются с интерференционной кривой.

Результирующие зависимости  $V(\alpha_n)$  в зоне тени рассчитаны по используемому набору профилей  $N(h)$ , часть из них в качестве иллюстрации приведена на рис. 5 (для параметра  $N_1$ : а) – 300; б) – 340; в) – 390). Видно, что при фиксированном  $N_1$  характеристики  $V(\alpha_n)$  имеют разный наклон для разных  $g_N$ , что подобно аналогичному расчету в зоне тени в случае внутриатмосферных трасс, использующему концепцию эквивалентного радиуса Земли (см. [22], рис. 4.12; [14], рис. 6.7). Отличие нашего расчета от [14, 22] заключается в появлении зависимости также от  $N_1$ , как следствие прохождения сигнала от источника к приемнику через более сложную среду. В качестве информативных параметров, чувствительных к градиенту коэффициента преломления тропосферы, могут быть приняты: отсчет угла места на определенном уровне  $V_{p3}$  (угол радиозахода  $\alpha_{p3}$ ) и крутизна  $S = dV/d\alpha$  дифракционного участка зависимости  $V(\alpha_n)$ .

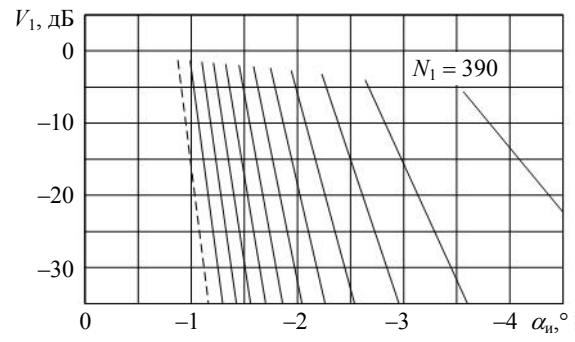
По определению [7] моменты (в нашем случае – углы) радиовосхода или радиозахода соответствуют появлению или исчезновению сигнала на определенном уровне, поэтому зависят от характеристик конкретной аппаратуры. Для восстановления градиента  $g_N$  в рамках рассмотренной модели, кроме измерений  $\alpha_{p3}$ , необходимы данные о приземном значении коэффициента преломления  $N_1$ . Можно отметить, что судя по графикам рис. 5 приращение угла радиозахода  $\alpha_{p3}$  при изменении параметров  $g_N$  и  $N_1$  тем больше, чем на более глубоком уровне берется отсчет, т. е. чем больше проникновение в область тени.



а)



б)



в)

Рис. 5. Рассчитанные характеристики  $V(\alpha_n)$ : сплошные линии – при градиентах от  $g_N = -0,05$  до  $-0,15$   $N$ -ед./м; пунктир – расчет для стандартного профиля ( $g_N = -0,04$   $N$ -ед./м,  $N_1 = 289$   $N$ -ед.)

Использование  $S$  в качестве информативного параметра отличается тем, что не зависит от уровня множителя ослабления и параметра  $N_1$ . Однако при этом необходимо, чтобы крутизна определялась в области более глубокой тени, где, в отличие от полутени, спадание множителя ослабления происходит по экспоненциальному закону [16]. С другой стороны, в области глубокой тени, когда поле прямого сигнала сильно ослаблено, возможны искажения рассмотренных характеристик из-за флуктуаций, вызванных другими, кроме дифракционного, механизмами распространения радиоволн.

**Выводы.** На основе разработанной полупэмпирической численной модели, использующей

геометрооптические и дифракционные расчеты, произведены оценки параметров тропосферной рефракции в области геометрической тени по сигналам удаленного источника.

При малых положительных углах места углы рефракции определяются градиентом  $g_N$  и приземным значением  $N_1$  профиля коэффициента преломления тропосферы. При увеличении угла места связь угла рефракции с градиентом уменьшается, в пределе остается зависимость от приземного значения, в соответствии с теоремой Лапласа.

При уменьшении угла наблюдения и переходе в область тени для оценки градиента коэффициента преломления в качестве рабочих характеристик могут использоваться: крутизна дифракционной характеристики множителя ослабления и отсчеты углов радиозахода на определенном уровне (при известном значении  $N_1$ ).

Рассчитанный набор (банк) угломестных зависимостей множителя ослабления, имитирующих радиозаход спутников GPS при различных параметрах линейно-экспоненциального профиля  $N(h)$ , может быть использован для восстановления градиента коэффициента преломления в приводном слое методом параметрического перебора, путем сравнения экспериментальных и расчетных характеристик радиозаходов ИСЗ.

#### Библиографический список

1. COSMIC System Description / C. Rocken, Y.-H. Kuo, W. Schreiner et al. // Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sci. – 2000. – 11, N 1. – P. 21–52.
2. Braun J. Validation of line-of-sight measurements with GPS / J. Braun, C. Rocken, R. Ware // Radio Science. – 2001. – 36, N 3. – P. 459–472.
3. Anderson K. D. Inference of refractivity profiles by satellite-to-ground RF measurements / K. D. Anderson // Radio Science. – 1982. – 17, N 3. – P. 653–663.
4. Nilsson T. Water Vapor Tomography Using GPS Phase Observations: Simulation Results / T. Nilsson, L. Gradinarsky // IEEE Trans on GRS. – 2006. – 44, N 10. – P. 2927–2941.
5. Изменчивость характеристик сигналов GPS, распространяющихся в приводном слое атмосферы / В. Б. Замараев, В. А. Кабанов, Г. М. Моргун, В. Б. Сеницкий // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – X., 2004. – 9, № 3. – С. 541–548.
6. Вариации тропосферной рефракции над морем. Совместные измерения на стационарной и спутниковых трассах / В. Б. Замараев, В. А. Кабанов, Г. М. Моргун, В. Б. Сеницкий // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – X., 2005. – 10, № 3. – С. 386–393.
7. О некоторых результатах определения электронной концентрации внешней области ионосферы по наблюдениям за радиосигналами первого спутника Земли / Я. Л. Альперт, Ф. Ф. Добрякова, Э. Ф. Чудесенко и др. // Успехи физ. наук. – 1958. – LXV, вып. 2, № 6. – С. 161–174.
8. Дальнее тропосферное распространение ультракоротких радиоволн (обзор) / Н. А. Арманд, Б. А. Введенский, А. И. Калинин и др. // Радиотехника и электрон. – 1961. – 6, № 6. – С. 867–885.
9. Дальнее тропосферное распространение ультракоротких радиоволн / Н. А. Арманд, Б. А. Введенский, А. И. Калинин и др., под ред. Б. А. Введенского. – М.: Сов. радио, 1965. – 416 с.
10. Калинин А. И. Распространение радиоволн на трассах наземных и космических радиолоний / А. И. Калинин. – М.: Связь, 1979. – 266 с.
11. Фок В. А. Проблемы диффракции и распространения электромагнитных волн / В. А. Фок. – М.: Сов. радио, 1970. – 518 с.
12. Азрилянт П. А. Численные результаты теории диффракции радиоволн вокруг земной поверхности / П. А. Азрилянт, М. Г. Белкина. – М.: Сов. радио, 1957. – 44 с.
13. Калинин А. И. Распространение радиоволн и работа радиолоний / А. И. Калинин, Е. Л. Черенкова. – М.: Связь, 1971. – 440 с.
14. Голев К. В. Расчет дальности действия радиолокационных станций / К. В. Голев. – М.: Сов. радио, 1962. – 204 с.
15. Бин Б. Р. Радиометеорология / Б. Р. Бин, Е. Дж. Даттон; пер. с англ. под ред. А. А. Семенова. – Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1979. – 362 с.
16. Фейнберг Е. Л. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности / Е. Л. Фейнберг. – 2-е изд. – М.: Физматлит, 1999. – 496 с.
17. Norton K. A. The Use of Angular Distance in Estimating Transmission Loss and Fading Range for Propagation through a Turbulent Atmosphere over Irregular Terrain / K. A. Norton, P. L. Rice, L. E. Vogler // Proc. of the IRE. – 1955. – 43, N 10. – P. 1488–1526.
18. Ames L. A. Some Characteristics of Persistent VHF Radiowave Field Strengths Far Beyond the Radio Horizon / L. A. Ames, E. J. Martin, T. F. Rogers // Proc. of the IRE. – 1959. – 47, N 5. – P. 769–777.
19. Диагностика условий распространения УКВ в тропосфере / Б. В. Жуков, В. А. Кабанов, И. М. Мыщенко и др.; под ред. Г. И. Хлопова. – К.: Наук. думка, 2010. – 264 с.
20. Millman G. H. Atmospheric Effects on VHF and UHF Propagation / G. H. Millman // Proc. of the IRE. – 1958. – 46, N 8. – P. 1492–1501.
21. Колосов М. А. Рефракция электромагнитных волн в атмосферах Земли, Венеры и Марса / М. А. Колосов, А. В. Шабельников. – М.: Сов. радио, 1976. – 220 с.
22. Михайлов Н. Ф. Радиометеорологические исследования над морем / Н. Ф. Михайлов, А. В. Рыжков, Г. Г. Щукин. – Л.: Гидрометеоздат, 1990. – 208 с.

Рукопись поступила 21.05.2014.

V. B. Zamarajev, V. B. Sinitzky

#### DETERMINATION OF TROPOSPHERE REFRACTIVE CHARACTERISTICS IN SHADOW ZONE BY DISTANT SOURCE RADIATION Part 1. Model

The estimation of troposphere refraction using the satellites signals is the actual task because it is related to practical important problem of short-term radio waves propagation diagnostics. The paper is devoted to the development of imitating computer model for satellite's setting in the zone of a geometrical shadow where the effects of troposphere refraction are enhanced. The model uses the numerical calculations based on the diffraction and ray optics principles. The calculations are carried out for the Earth of natural radius, because in the case with a distant source the concept of equivalent radius of the Earth is inapplicable. The results of calculations of attenuation factor in the field of the geometrical shadow, executed according to the diffraction theory for a virtual source, are transformed on the horizon of a real distant source by ray optics modeling for the layered-stratified atmos-

phere. The principle establishing equality of an attenuation factor on links with the common over-the-horizon site is used. Calculations of attenuation factor are executed for a set of linearly-exponential profiles of troposphere refractive index at different ground values and various gradients (from standard to almost critical refraction). The received characteristics can be used for solution of the inverse problem of refraction i.e. restoration of refractive index gradient of the troposphere surface layer. It is shown that informative parameters for estimation of refraction are the angle of radiosetting and the slope of a diffraction site of attenuation factor.

**Key words:** troposphere refraction, shadow zone, distant source, attenuation factor.

В. Б. Замараєв, В. Б. Синицький

ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК  
ТРОПОСФЕРНОЇ РЕФРАКЦІЇ  
В ЗОНІ ТІНІ ПО ВИПРОМІНЮВАННЮ  
ВІДДАЛЕНОГО ДЖЕРЕЛА  
Частина 1. Модель

Оцінка тропосферної рефракції по сигналам штучних супутників Землі (ШСЗ) є актуальною задачею, тому що відноситься до практично важливої проблеми короткостроко-

вої діагностики умов поширення радіохвиль. Стаття присвячена розробці моделі, імітуючої захід ШСЗ в області геометричної тіні, у якій ефекти тропосферної рефракції максимальні. Модель використовує числові розрахунки, які ґрунтуються на дифракційних та геометрооптичних побудовах. Так як у випадку з віддаленим джерелом концепція еквівалентного радіуса Землі незастосовна, розрахунки проведено для Землі натурального радіуса. Результати розрахунків множника послаблення в області геометричної тіні, виконаних по дифракційній теорії для віртуального джерела, трансформуються на горизонт реального віддаленого джерела за допомогою геометрооптичної моделі для шарово-стратифікованої атмосфери. Використовується принцип, який встановлює рівність множників послаблення на трасах із загальною загоризонтною ділянкою. Розрахунки множника послаблення виконано для набору лінійно-експоненціальних профілів коефіцієнта заломлення тропосфери при різних приземних значеннях і градієнтах (від стандартної до майже критичної рефракції). Одержані характеристики можуть бути використані для розв'язання зворотної задачі рефракції – відновлення градієнта коефіцієнта заломлення приводного шару тропосфери. Показано, що інформативними параметрами для оцінки рефракції є кут радіозаходу та крутизна дифракційної ділянки множника послаблення.

**Ключові слова:** тропосферна рефракція, зона тіні, віддалене джерело, множник послаблення.