

## **ОЦЕНКА ДИСТАНЦИОННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ УВЧ РАДИОПОЛЯ НАД МОРЕМ ДЛЯ ПРОИЗВОЛЬНЫХ ВЫСОТНЫХ ПРОФИЛЕЙ КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕЛОМЛЕНИЯ ВОЗДУХА**

### **Введение**

В результате многочисленных исследований [1 – 4 и др.] было установлено, что зона действия радиотехнических систем УКВ диапазона определяется состоянием пограничного слоя атмосферы в районе расположения радиотрасс. Нестационарность атмосферных процессов, особенно в ее пограничном слое, определила необходимость развития контактных и дистанционных методов зондирования пограничного слоя и разработку на их основе методов диагноза и прогноза радио- и радиолокационной наблюдаемости, объединенных в рамках универсальной системы диагноза и прогноза [4 – 6].

Основная задача диагноза и прогноза может быть сформулирована как определение путей повышения эффективности использования радиосредств. Наиболее сложная часть задачи заключается в предсказании ожидаемых дальности и зоны действия конкретной радиотехнической системы для существующих атмосферных условий, а также в выявлении частотного диапазона, являющегося оптимальным для этих условий. Итоговое решение задачи диагноза и прогноза, представленное в виде диаграмм видимости [4, 5, 7], позволяет получить информацию, необходимую для оптимального применения имеющихся радиотехнических систем.

Диагноз на основе решения прямой задачи рефракции по измеренному высотному профилю индекса рефракции  $N(h)$  принципиально возможен для любого частотного диапазона. Однако к настоящему времени расчет интенсивности поля в пространстве за пределами прямой видимости дает положительные результаты только для нескольких частных видов профиля  $N(h)$ , которые можно аппроксимировать кусочно-линейной зависимостью.

В данной работе на базе результатов комплексных экспериментальных радиофизических и метеорологических исследований пограничного слоя атмосферы рассматривается возможность оценки дистанционных зависимостей множителя ослабления радиополя УВЧ диапазона для произвольного высотного профиля показателя преломления воздуха.

### **Методика проведения комплексных радиофизических и метеорологических исследований пограничного слоя тропосферы в прибрежной зоне**

В ходе комплексных исследований загоризонтного распространения УКВ над поверхностью моря был разработан метод диагноза, основанный на приближенном совпадении множителей ослабления на трассах с общим загоризонтным участком вдоль поверхности Земли.

Как показано в [4, 5], диагноз радио- и радиолокационной наблюдаемости по данным радиопросвечивания обеспечивает выполнение задачи диагноза в открытых акваториях и прибрежных зонах, но требует проведения зондирования (просвечивания) в каждом частотном диапазоне.

В процессе экспериментального обоснования метода радиофизические исследования в диапазонах волн 4 и 35 см сопровождались измерениями высотного профиля индекса рефракции  $N(h)$ . Исследования проводились в прибрежной зоне, поэтому зондирования высотного профиля выполнялись с борта корабля, который находился на удалении 47 км от береговой черты. Схема расположения корреспондирующих пунктов, корабля и маршруты движения носителя источников приведена на рис.1, где  $lS_1$  – касательная к поверхности Земли,  $K_1$  – точка касания, соответствующая расстоянию радиогоризонта приемных антенн.

Общий для обоих частотных диапазонов приемный пункт 1 располагался вблизи береговой черты на высоте около 25 м над уровнем моря. Источники непрерывного излучения

обоих диапазонов волн (пункты 2 и 3) размещались на борту самолета, выполнявшего радиальные полеты относительно приемного пункта 1 на высотах  $h_2$ : 100 и 200 м (маршрут АБ), а также  $h_3 = 1500$  м (маршрут А'Б'). В каждом частотном диапазоне регистрировалась временная зависимость уровня мощности радиополя, которая в результате первичной обработки преобразовывалась в дистанционную зависимость множителя ослабления поля  $V(R)$  относительно его уровня в свободном пространстве.

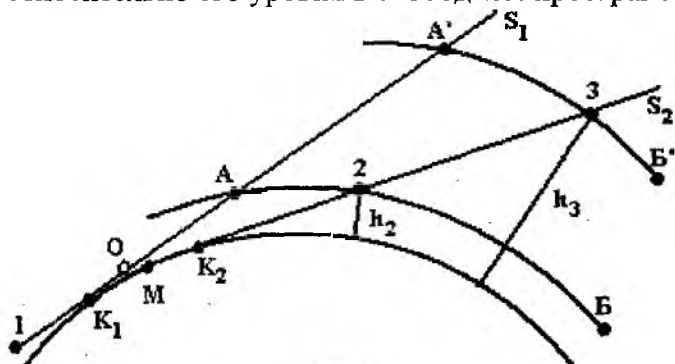


Рис. 1

В точке  $M$ , расположенной в зоне ближней тени относительно приемного пункта 1, находится корабль, с борта которого в диапазоне высот (6...300) м проводились измерения высотных профилей температуры, давления и влажности. Эти данные при первичной обработке использовались для расчета высотного профиля индекса рефракции  $N(h)$ .

Экспериментальные работы были проведены в летний период. Это позволило охватить разнообразные состояния пограничного слоя атмосферы – от практически стандартных до аномальных, характеризующихся мощными инверсионными образованиями.

Радиофизические и метеорологические измерения проводились практически синхронно, что позволяло оперативно в процессе проведения исследований сопоставлять и классифицировать результаты метео- и радиозондирований в рамках нескольких типов условий распространения радиоволн [4, 7]. Положительные результаты сопоставления подтвердили правильность выбора места измерения высотного профиля  $N(h)$ . Поэтому измеренные высотные профили  $N(h)$  могут быть использованы для проведения оценочных расчетов дистанционных зависимостей множителей ослабления  $V(R)$ , а результаты непосредственного измерения  $V(R)$  – для проверки результатов этих расчетов.

Диагностика загоризонтного распространения радиоволн методом просвечивания эталонными источниками основана на связи множителей ослабления  $V_{12}$  и  $V_{13}$  на трассах 1-2 и 1-3, имеющих общий участок  $K_1K_2$  (см. рис.1):  $V_{12} = CV_{13}$ . В результате исследований установлено, что отношение  $C = V_{12}/V_{13}$  остается близким к единице в широком интервале изменений  $V_{12}$  и  $V_{13}$  (от  $-2$  дБ до  $-60$  дБ) и практически не зависит от длины общего участка  $K_1K_2$  и высоты  $h_3$  [5]. При этом величина множителя ослабления остается практически неизменной вдоль касательных к поверхности Земли (см., например касательную  $K_2S_2$  на рис.2).

Экспериментальные данные [4, 6] позволяют сделать вывод, что значения  $V(R)$  вблизи границы геометрической тени, полутени и тени в значительной мере определяются состоянием тропосферы в ограниченном по высоте приземном слое, который можно считать областью, существенной для формирования поля за радиогоризонтом.

#### Область, существенная для формирования поля вблизи геометрической тени

В работе [4] на основании проведенных исследований на прибрежной трассе прямой видимости подтверждено, что высота слоя, существенного для распространения радиоволн, составляет 6...8 первых зон Френеля с учетом высоты корреспондирующих пунктов.

Оценку верхней границы области  $v_c$ , существенной для формирования поля на закрытых трассах, можно получить исходя из представлений о парциальных источниках [9, 10], введенных в работе [9] для описания пространственной структуры эквивалентных источни-

ков вторичных волн. Под парциальным источником вторичных волн понимается протяженная область пространства  $v_i(x, y, z)$ , в пределах которой могут находиться фазовые центры элементарных вторичных волн, в сумме образующих парциальную волну  $E_i$ . Эта волна в пределах малого телесного угла  $\Omega$  на расстоянии  $R$  от источника описывается выражением

$$E_i = \frac{\xi}{|\mathbf{R} + \mathbf{r}|} e^{j(k|\mathbf{R} + \mathbf{r}| + \delta)} e^{j\omega t}, \quad (1)$$

где  $\xi$  – случайное число, а малые величины  $|\mathbf{r}|$  и  $\delta$  удовлетворяют неравенствам  $|\mathbf{r}|/|\mathbf{R}| \ll 1$ ,  $\delta < \pi/2$ . Такая «почти сферическая» волна при  $R \rightarrow \infty$  становится «чисто сферической».

Предположим, что в пределах телесного угла  $\Omega$  находятся все углы рассеяния  $\theta$ , т.е. углы между волновыми векторами падающей  $\mathbf{k}_0$  и вторичной  $\mathbf{k}_s$  волн, характерные для рассматриваемой задачи. В этом случае максимальные размеры парциального источника в направлении распространения падающей волны ( $L$ ) и в поперечном направлении ( $d$ ) составляют

$$L = \delta\lambda / \pi\theta^2, \quad d = \delta\lambda / 2\pi\theta. \quad (2)$$

Существенно, что отношение  $L/d = 2/\theta$  не зависит от малого параметра  $\delta$  и физической природы вторичных волн.

Для закрытых трасс, на которых выполнялись комплексные радиофизические исследования, характерный угол рассеяния  $\theta \approx 0,4^\circ$ . При таких углах  $\theta$  отношение  $L/d \approx 280$ . Чтобы оценить линейные размеры парциального источника вторичных волн, положим  $\delta = \pi/2$ ,  $\lambda = 0,35$  м,  $\theta = 0,4^\circ$ . Тогда из равенств (2) следует:  $L \approx 10034\lambda = 3512$  м,  $d \approx 35,4\lambda = 12$  м.

Каждый такой протяженный парциальный источник аналогичен линейной антенной системе бегущей волны («линейной решетке»). Совокупность парциальных источников, находящихся в области, существенной для формирования поля за радиогоризонтом, создает в точке приема суммарное поле как результат интерференции парциальных волн со случайными амплитудами.

Исходя из такой интерпретации рассеяния, можно рассчитать угловое распределение рассеянного поля методами статистической теории антенн [11]. Как показано в работе [9], при рассеянии волн на флуктуациях диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  средняя интенсивность рассеянного поля пропорциональна квадрату средней диаграммы направленности «решетки» по мощности. Для приведенного выше примера ширина диаграммы направленности вторичного излучения  $\beta$  на уровне  $-3$  дБ составляет менее  $1^\circ$  и слабо зависит от амплитудно-фазовых возмущений, связанных с флуктуациями диэлектрической проницаемости воздуха. Влияние этих флуктуаций проявляется главным образом в сглаживании боковых лепестков диаграммы направленности [11].

Высота  $H$  источника вторичных волн над поверхностью Земли, протяженность трассы  $R$  и угол рассеяния  $\theta$  взаимосвязаны. Простые геометрические расчеты показывают, что при  $H > 500$  м и протяженности трассы более 60 км угол  $\theta$  превышает ширину диаграммы направленности вторичного излучения «решетки». Поэтому при расчетах поля должны быть учтены в первую очередь характеристики приземного слоя тропосферы до высоты около 400 м. Горизонтальная протяженность области  $v_c$  (рис. 2) в направлении распространения падающей волны  $L_x$  точно не известна. Выбранные при расчетах значения  $L_x$  могут быть уточнены только при сравнении расчетных и экспериментальных зависимостей  $V(R)$ .

## Методика и результаты расчетов

При инженерном расчете поля и множителя ослабления мы исходим из предположения, что источники вторичных волн локализованы в ограниченной области  $v_c(x, y, z)$ , расположенной в непосредственной близости к поверхности Земли (рис.2). В выбранной системе координат ось  $x$  параллельна волновому вектору падающей волны  $\mathbf{k}_0$ , а начало координат находится в точке  $O$ , расположенной на касательной  $K_1S_1$  (см. рис. 1). Точки 1 и 2 обозначают

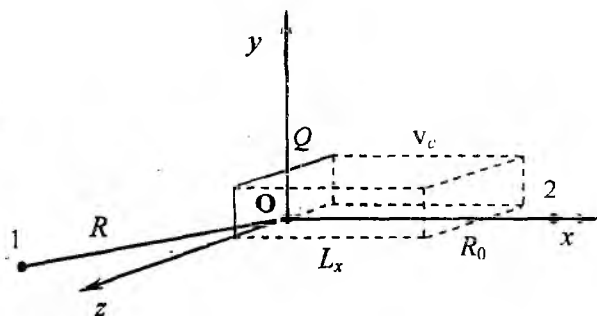


Рис. 2

положение в пространстве приемной и передающей антенн;  $R_0$  и  $R$  – расстояния от этих точек до начала координат  $O$ .

Угловое распределение поля за радиогоризонтом  $E_s(\theta, \varphi)$  при малых углах рассеяния можно однозначно связать с некоторым полем  $E_Q(y, z)$  в области  $Q$  на плоскости  $y, z$ , причем эта область находится в пределах прямой видимости передающей и приемной антенн. За пределами области  $Q$

полагаем  $E_Q = 0$ . Комплексные амплитуды поля  $E_Q(y, z)$ , в соответствии с принципом Гюйгенса-Кирхгофа, можно считать полем эквивалентных источников вторичных волн.

Расчет поля  $E_s(\theta, \varphi)$  выполняется в два этапа. Вначале вычисляется поле эквивалентных источников излучения  $E_Q$ , а затем решается внешняя задача теории антенн [12], т.е. рассчитывается диаграмма направленности системы в дальней зоне или поле в зоне дифракции Френеля  $E_s(R, \theta, \varphi)$ . Такой путь решения позволяет получить в результате одного интегрального преобразования непрерывное угловое распределение комплексных амплитуд поля как в зоне прямой видимости, так и в области полутени. Этих данных достаточно для вычисления множителя ослабления в пределах заданного телесного угла  $\Omega$ .

Расчет поля эквивалентных источников  $E_Q$ , в силу малости углов  $\theta$ , выполняется методом геометрической оптики с поправкой к эйконалу первого порядка [13], а в поле падающей волны приближенно учитывается отражение от земной поверхности [14].

Горизонтальный размер  $L_x$  области  $v_c(x, y, z)$ , необходимый для вычисления поправки к эйконалу, принимался равным расстоянию радиогоризонта передатчика или меньшим этого расстояния.

Исходными данными для расчета дистанционной зависимости множителя ослабления  $V(R)$  являются полученные в ходе экспериментальных работ профили вертикального распределения индекса рефракции  $N(h)$ , длина волны  $\lambda$  и высоты корреспондирующих пунктов  $h_1$  и  $h_{2,3}$  над поверхностью Земли. Для оценочных расчетов профили  $N(h)$  выбирались таким образом, чтобы охватить различные состояния атмосферы от практически стандартных до аномальных. Непосредственными результатами вычислений являются угловые распределения комплексных амплитуд поля  $E_s(R, \theta, \varphi)$ , на основе которых рассчитываются зависимости  $V(R)$  с учетом геометрического радиуса Земли.

Расчеты  $V(R)$  выполнены для длины волны  $\lambda = 0,35$  м, высоты приемника  $h_1 = 25$  м и нескольких высот передатчика  $h_{2,3}$ : 100 м, 200 м, 1500 м. Графики измеренных высотных профилей  $N(h)$  и соответствующие дистанционные зависимости  $V(R)$ , полученные экспериментально и путем расчета, приведены ниже. На всех графиках  $N(h)$  сплошной линией нанесен профиль  $N_{cm}(h)$  для «стандартной» атмосферы. На графиках  $V(R)$  сплошными ли-

Видны показаны результаты экспериментальных измерений, штриховыми и пунктирными – расчетные зависимости. Вертикальной штриховой линией обозначена граница области прямой видимости.

Профили № 1 и 2 (рис.3, а) были измерены с небольшим промежутком времени и практически совпадают с профилем  $N(h)$  в «стандартной» атмосфере. Рассчитанные значения множителя ослабления для этих профилей при  $h_2 = 100$  м приведены на рис.3, б. По горизонтали указано расстояние от передатчика до приемной антенны. Сплошной линией с маркерами нанесены результаты расчета  $V(R)$  по дифракционным формулам [14].

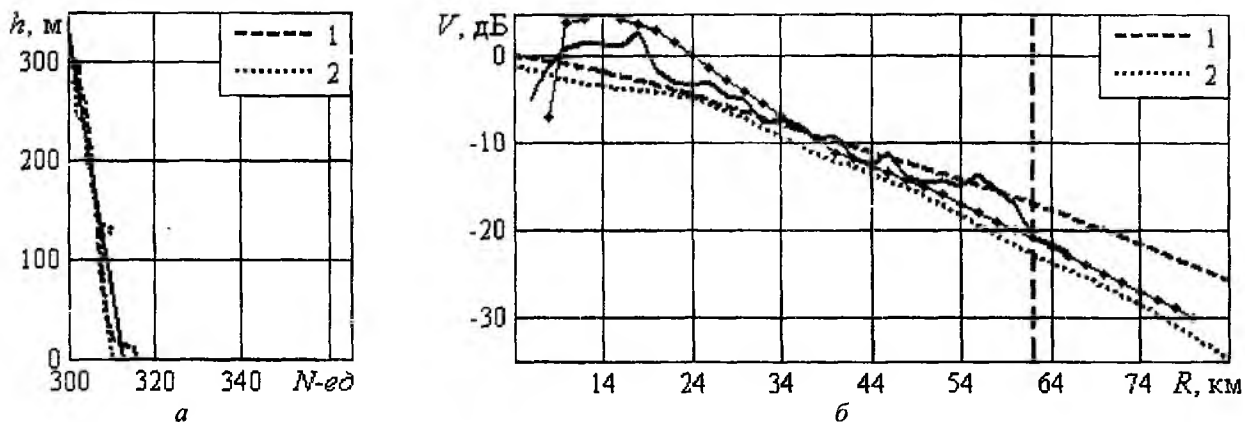


Рис. 3

Как видно из рис. 3, б, экспериментальные данные в основном относятся к области прямой видимости. Расчетные кривые  $V(R)$  в этом интервале расстояний удовлетворительно согласуются с экспериментом. Здесь протяженность участка трассы  $L_x$  принята равной расстоянию радиогоризонта передатчика:  $L_x = \sqrt{2R_3 h_2} = 35,7$  км, где  $R_3 = 6380$  км.

Результаты аналогичного расчета  $V(R)$  для профиля № 3 приведены на рис.4. При  $L_x = 35,7$  км расчетная и экспериментальная зависимости согласуются на загоризонтном участке, но вблизи геометрической тени расхождение достигает 20 дБ.

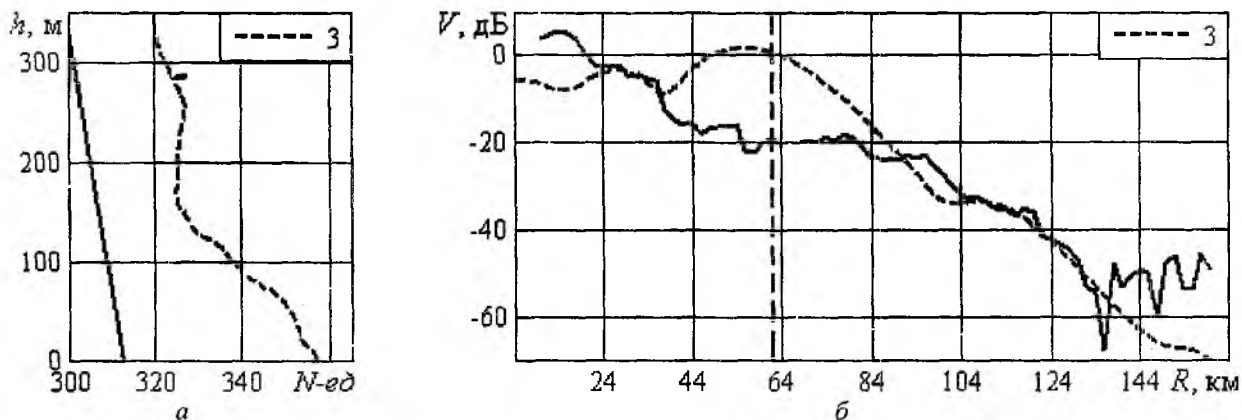


Рис.4

Особенность профилей № 4 и 5 (рис.5, а), измеренных с получасовым интервалом, заключается в наличии ярко выраженной приподнятой инверсии. Расчетные зависимости  $V(R)$  получены при высоте передатчика  $h_2 = 200$  м,  $L_x = 50$  км.

Характерная особенность рассчитанных зависимостей  $V(R)$  состоит в наличии глубоких минимумов и практически постоянном уровне максимумов на протяжении всей трассы. Эти особенности наблюдаются и в экспериментальных данных.

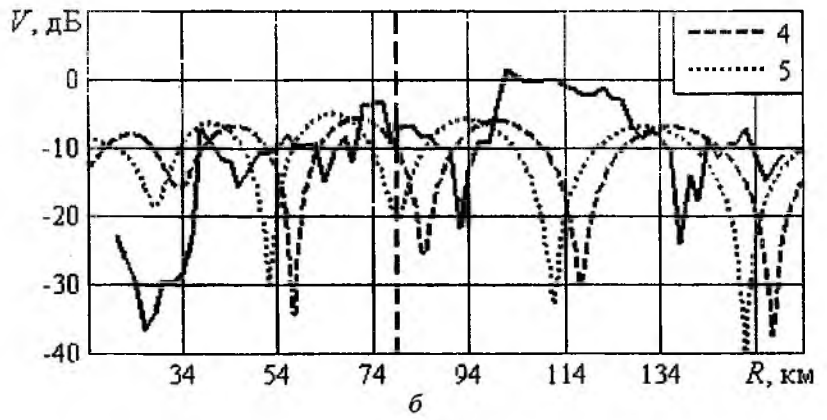
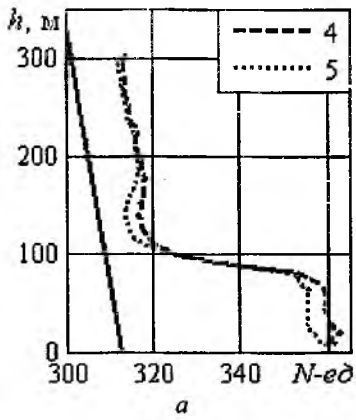


Рис.5

При такой же высоте передатчика ( $h_2 = 200$  м) рассчитана зависимость  $V(R)$  для профиля № 6 (рис.6).

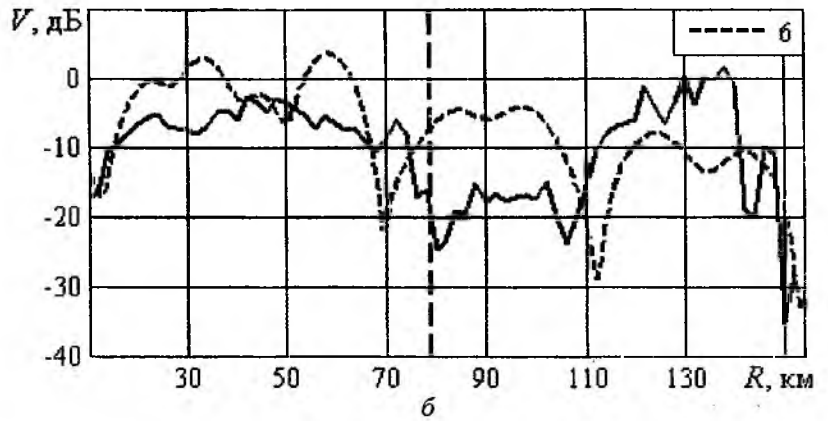
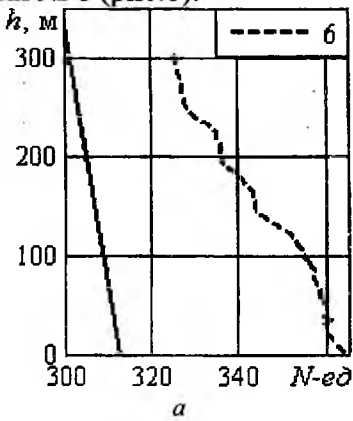


Рис.6

Несмотря на то, что в профиле № 6 отсутствуют ярко выраженные слои, поле за горизонтом в среднем убывает медленно и наблюдаются глубокие минимумы, характерные для зависимости, приведенной на рисунке 5, б.

Расчеты для профиля №7 выполнены при высоте передатчика над поверхностью Земли  $h_3 = 1500$  м и высоте приемной антенны  $h_1 = 25$  м (рис.7).

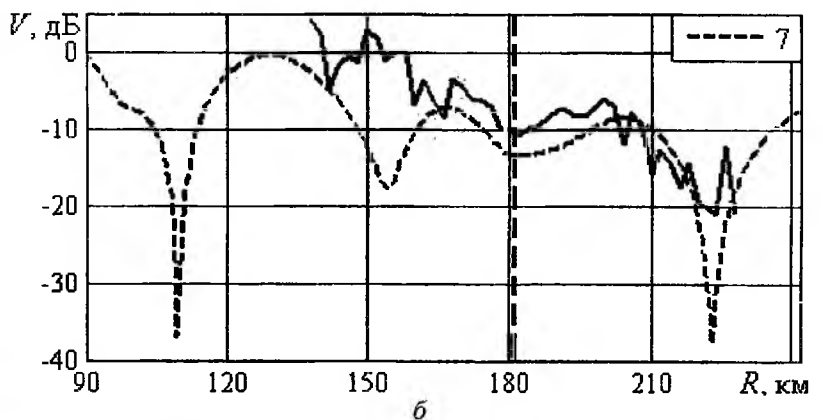
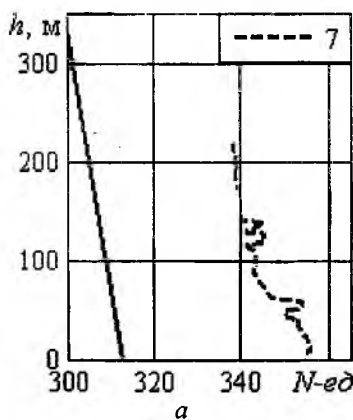


Рис.7

Количественные расхождения и разный ход кривых  $V(R)$  в данном случае могут быть связаны с тем, что в требуемом интервале высот кривые  $N(h)$ , измеренные до  $h = 220$  м, продолжены до  $h = 400$  м со «стандартным» градиентом. Здесь  $L_x = 138$  км и равно расстоянию радиогоризонта передатчика.

Результаты расчета  $V(R)$  на такой же трассе для профиля № 8 (рис.8) указывают на рост среднего уровня сигнала при переходе от области прямой видимости к области тени.

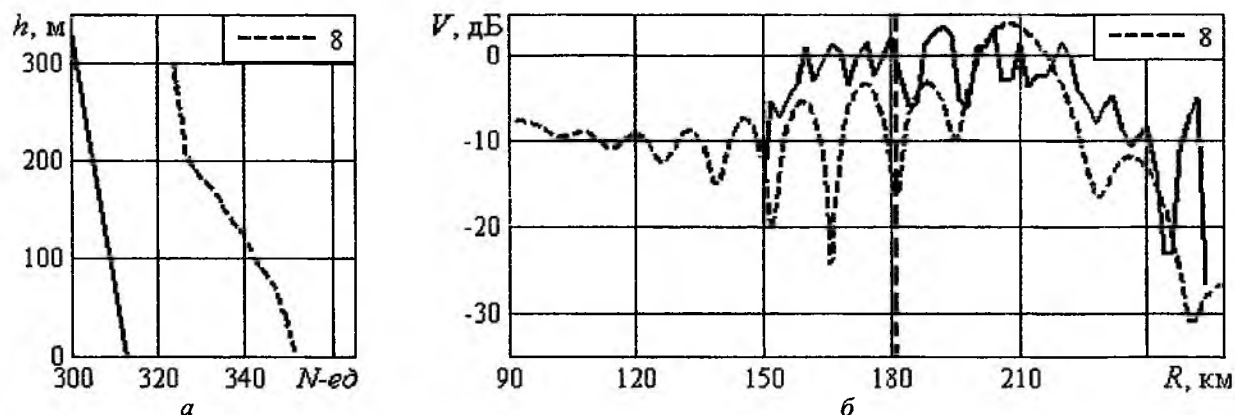


Рис.8

Критерии совпадения либо расхождения расчетных и экспериментальных данных, очевидно, зависят от характера конкретной прикладной задачи. Если цель расчета состоит в определении соотношения уровней поля в областях прямой видимости и геометрической тени, то предложенная методика инженерного расчета позволяет приблизительно решить такую задачу и выявить основные особенности хода дистанционной зависимости  $V(R)$ .

### Выбор протяженности области, существенной для распространения радиоволн

При вычислении эйконала используется первое приближение метода малых возмущений, которое можно считать справедливым лишь для ограниченных значений  $L_x$ . Поэтому при расчетах желательно использовать минимальные достаточные значения этого параметра. Влияние выбора  $L_x$  на результаты расчета  $V(R)$  иллюстрирует приведенный ниже рисунок, где показаны результаты расчетов  $V(R)$  при разных значениях  $L_x$  для профилей № 3 (рис.9, а) и № 5 (рис.9, б). На графиках рядом с обозначением линий указана выбранная при расчетах величина  $L_x$ . Утолщенной сплошной линией показана экспериментальная кривая.

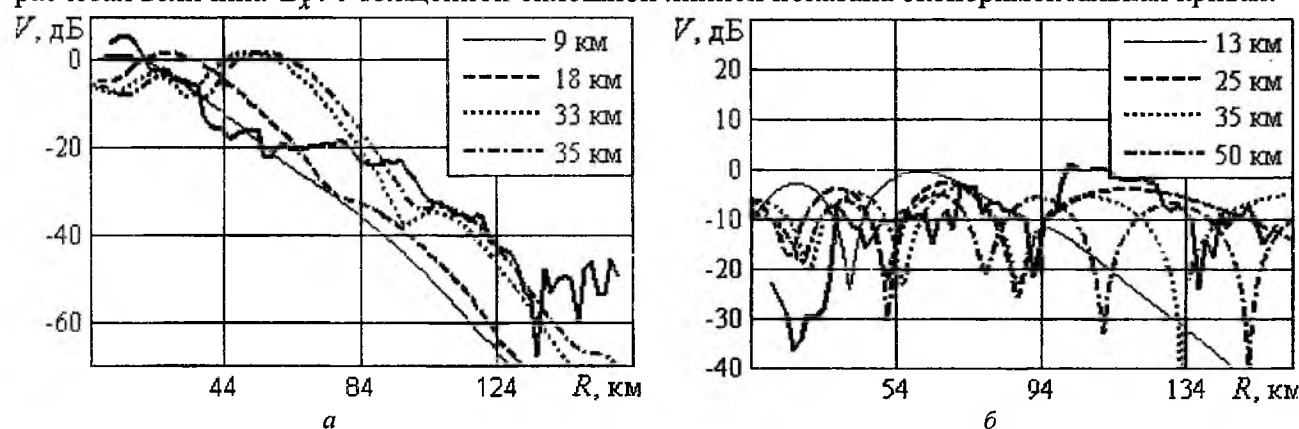


Рис.9

Если исходить из критерия минимального среднеквадратического отклонения расчетных и экспериментальных кривых, то оптимальное значение  $L_x$  оказывается меньше расстояния радиогоризонта передатчика. Для профиля с ярко выраженной инверсией (см. рис. 5, а, рис. 9, б) оптимальное значение  $L_x$  составляет около 70% расстояния радиогоризонта передающей антенны. В случае, когда  $L_x \approx 0.5\sqrt{2R_3h_2}$ , расчетный ход зависимости  $V(R)$  в дециметровом диапазоне волн сохраняет основные особенности.

## Выводы

Разработана методика расчета поля и множителя ослабления, опирающаяся на промежуточный расчет эквивалентных источников вторичных волн. Эта методика позволяет в реальном масштабе времени получить приближенную оценку текущих значений множителя ослабления  $V(R)$ , как в освещенной области, примыкающей к радиогоризонту, так и в области тени для экспериментально измеренных высотных профилей индекса рефракции  $N(h)$ .

Этим же путем можно получить трехмерное распределение поля  $E_s(R, \theta, \varphi)$  или множителя ослабления  $V(R, \theta, \varphi)$ , если известно пространственное распределение индекса рефракции  $N(x, y, z)$  в области, существенной для формирования поля за радиогоризонтом.

Если задача решается при неполных априорных данных и предполагается, что индекс рефракции от горизонтальных координат не зависит, то оптимальные значения  $L_x$  составляют 70...100% расстояния радиогоризонта передатчика.

Методика принципиально применима к длинам волн метрового и дециметрового диапазона, однако в коротковолновой части этого диапазона волн расчет поля источников вторичного излучения должен быть более точным.

*Авторы признательны д.т.н. Г.И. Хлопову, д.ф.-м.н. Ф.В. Кивве и д.т.н. В.Б. Разказовскому за внимание к работе и полезные обсуждения.*

**Список литературы:** 1. *Распространение ультракоротких радиоволн:* Пер. с англ. / Под ред. Б.А. Шиллерова. – М.: Сов. радио, 1954. 2. *Хитни Г.В., Рихтер Ю.Х., Паннерт Р.А., Андерсон К.Д., Баумгартнер Дж.Б.* Распространение радиоволн в тропосфере: Обзор // ТИИЭР. – 1985. – Т.73, №2. – С.106-128. 3. *Фок В.А.* Проблемы дифракции и распространения электромагнитных волн. – М.: Сов. радио, 1970. – 517с. 4. *Диагностика условий распространения УКВ в тропосфере:* / Под ред. Г.И. Хлопова. – Киев: Наук. думка, 2010. – 264с. 5. *Жуков Б.В.,* Результаты натурной реализации диагноза радиолокационной наблюдаемости по данным радиопросвечивания атмосферы эталонными источниками // Радиотехника. – 2006. – Вып. 146. – С.242-249. 6. *C.P. Hattan, W.L., Patterson, H.V., Hitney etc.* IREPS Revision r.r. User Manual // Naval Ocean Syst. Cent. Techn. Doc.659, Oct.21, 1983. 7. *Hitney H.V., Richter J.H.* Integrated refractive effects prediction system (IREPS) // URSI Commission F Colloque Quert, Open Symposium La Baule (France), 28 april-6mai 1977, с.r. La Baule, 1977, p.55-60. 8. *Жуков Б.В., Андриенко Ю.А.* Результаты экспериментальных исследований множителя ослабления на морских трассах с общим участком вдоль поверхности раздела // Радиотехника. – 2006. – Вып. 145. – С.20-27. 9. *Петров В.А., Баранова Л.В.* Структура источников и направленность вторичного излучения при дальнем тропосферном распространении радиоволн // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч. - тех. сб. – 2005. – Вып.143. – С. 83-88. 10. *Петров В.А., Ключева А.М.* Еквівалентні джерела вторинного випромінення за умов тропосферного поширення радіохвиль // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч. - техн. сб. – 2008. – Вып. 154. – С. 48-51. 11. *Шифрин Я.С.* Вопросы статистической теории антенн. – М.: Сов. радио, 1970. – 384с. 12. *Шифрин Я.С.* Антенны. – Харьков: ВІРТА, 1976. – 408с. 13. *Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И.* Введение в статическую радиофизику. Ч. 2. Случайные поля. – М.: Наука, 1978. – 464с. 14. *Калинин А.И.* Распространение радиоволн на трассах наземных и космических радиолоний. – М.: Связь, 1979. – 296с.

*ІРЭ НАН України ім. Усикова,  
Харьковский национальний  
університет радіоелектроніки*

*Поступила в редакцію 17.01.2011*