

Ю. В. Левадный, В. К. Иванов, В. Н. Шаляпин

О СВЯЗИ ВЫСОТЫ ВОЛНОВОДА ИСПАРЕНИЯ И ОСЛАБЛЕНИЯ САНТИМЕТРОВЫХ РАДИОВОЛН В ЗАГОРИЗОНТНОЙ ОБЛАСТИ

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: yulev@ire.kharkov.ua*

Проведен анализ экспериментальных данных для выяснения взаимосвязи между высотой волновода испарения, определяемой по стандартным гидрометеорологическим измерениям, и ослаблением сантиметровых радиоволн в загоризонтной области. Показано, что уменьшение высоты волновода испарения, получаемой по метеоданным, на 3 м для малых высот волноводов, на 2 м для средних и 1 м для больших приводит к повышению точности диагностики распространения радиоволн. Подтверждено, что в тропических и субтропических областях Атлантического океана для низкорасположенных антенн волновод испарения является одним из основных механизмов распространения 3-см радиоволн. Ил. 6. Библиогр.: 18 назв.

Ключевые слова: атмосферный волновод, распространение радиоволн, численные методы.

Одним из факторов, оказывающих существенное влияние на распространение радиоволн над морем, является волновод испарения [1–4]. Он образовывается из-за высоких градиентов влажности вблизи морской поверхности и приводит к существенно более высоким уровням сигнала на загоризонтных трассах по сравнению с уровнями, характерными для дифракции и тропосферного рассеяния, что, соответственно, обуславливает повышенный интерес к вопросу волноводного распространения радиоволн [5–13]. Основными характеристиками волновода испарения является его высота, соответствующая минимуму в высотном распределении модуля приведенного коэффициента преломления M , и M -дефицит, который равен разности значений M в минимуме высотной зависимости и на границе раздела воздух-вода. Эти параметры достаточно сильно коррелируют, и поэтому на практике чаще пользуются только высотой волновода испарения. Для оценки этого значения обычно используют модели, основанные на теории подобия Монина-Обухова и использующие в качестве входных параметров стандартные гидрометеорологические измерения [14].

Простейший подход для оценки уровня сигнала при наличии волновода испарения основывается на анализе экспериментальных данных и поиске некоторой усредненной связи между уровнями сигнала на различных удалениях и высотой волновода испарения [13]. К недостаткам такого подхода можно отнести то, что не учитываются никакие дополнительные факторы, в частности, влияние ветра, от которого зависит как степень морского волнения, так и интенсивность турбулентных флуктуаций.

Другие подходы основаны на решении параболического волнового уравнения с использованием либо модовой теории, либо численных методов. На сегодняшний день метод пошагового

разбиения для численного решения параболического уравнения является более предпочтительным, так как он обладает высокой эффективностью и позволяет одновременно учитывать влияние различных факторов [15]. Однако этот подход также не всегда дает хорошие результаты, что связано с недостаточной точностью входных данных, таких как вертикальный профиль рефракции, степень морского волнения (которая зависит как от скорости ветра, так и длины разгона волны), параметры турбулентных флуктуаций коэффициента преломления (в частности, параметр анизотропии) [5]. Поэтому с целью повышения точности диагностики распространения радиоволн представляет интерес сравнение двух методов оценки высот волновода испарения: по стандартным гидрометеорологическим измерениям, используя теорию подобия Монина-Обухова [14], и по измеренному ослаблению радиоволн в загоризонтной области, которое оказывается тем большим, чем меньше высота волновода испарения.

В этой работе проведено такое сравнение, используя массив экспериментальных данных, полученный сотрудниками СКТБ ИРЭ НАН Украины в ходе исследований в Атлантическом океане [15].

1. Численное решение параболического уравнения методом пошагового разбиения. В двумерной декартовой системе координат, где оси x и z соответственно дальность и высота, стандартное параболическое уравнение имеет вид

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + 2ik \frac{\partial u}{\partial x} + k^2 [n^2 - 1] u = 0, \quad (1)$$

где $k = 2\pi / \lambda$ – волновое число в вакууме; n – коэффициент преломления.

Метод пошагового разбиения с использованием преобразования Фурье для решения уравнения (1) был предложен в 1973 г. Хардином и Таппертом и использовался в задачах подводной

акустики. Общий вид решения этим методом выглядит следующим образом [16]:

- разложение волны в угловой спектр с помощью преобразования Фурье;
- умножение на множитель, связанный с расходимостью в свободном пространстве на одном шаге вычисления;
- обратное фурье-преобразование в координатное представление;
- умножение на дополнительный множитель, учитывающий набег фазы в среде (рефракция):

$$u(x + \Delta x, z) = e^{-ikm(x,z)\frac{\Delta x}{2}} F^{-1}\left(e^{ik\sqrt{k^2 - p^2}} F[u(x, z)] \right), \quad (2)$$

где F и F^{-1} – прямое и обратное преобразование Фурье; Δx – шаг по дистанции; $p = k \sin(\theta)$ – функция угла распространения θ ; $m(z) = n(z) - 1 + z/a_e$ – модифицированный коэффициент преломления; a_e – радиус Земли; $u(x, z) = \psi(x, z)e^{-ikx}$, здесь ψ – электрическая или магнитная компонента поля для горизонтальной или вертикальной поляризации соответственно.

Вид преобразования Фурье в выражении (2) определяется граничными условиями и, следовательно, для граничных условий Дирихле используется синусное преобразование, а для граничных условий Неймана – косинусное. Для поверхностей с конечной проводимостью и для учета морского волнения используется линейная комбинация синусного и косинусного преобразований Фурье [17].

Отражение радиоволн от взволнованной морской поверхности учитывается в рамках метода касательной плоскости [16]. Для этого используется понятие эффективного коэффициента отражения, который выражается как произведение коэффициента отражения Френеля R и множителя ρ , учитывающего ослабление когерентной компоненты поля из-за неровности морской поверхности:

$$R_{eff} = \rho R. \quad (3)$$

Для модели Миллера, Брауна и Вега [18] коэффициент ρ имеет вид

$$\rho = \exp\left(-\frac{1}{2}(2q\sigma_\xi)^2\right) I_0\left(\frac{1}{2}(2q\sigma_\xi)^2\right), \quad (4)$$

где $q = k \sin(\alpha)$; k – волновое число радиоволны; α – угол скольжения; σ_ξ – среднеквадратичное отклонение высоты морской поверхности; I_0 – функция Бесселя.

2. Экспериментальные данные. Экспериментальные исследования проводились коллективом СКТБ НАН Украины в тропической и субтропической областях Атлантического океана (рис. 1) в период май – начало июня и конец июня – начало июля 1979 г. [15]. Измерение множителя ослабления осуществлялось между двумя судами, которые находились в совместном плавании при их расхождении и сближении. Исследования проводились для волн 3,2; 10; 50 и 200 см. Параллельно на обоих судах каждый час проводились стандартные гидрометеорологические измерения (определялись температура морской поверхности и скорость ветра, температура воздуха, давление на уровне палубы), а также аэрологическое зондирование атмосферы. Подробное описание методики проведения эксперимента приведено в работах [4, 5].

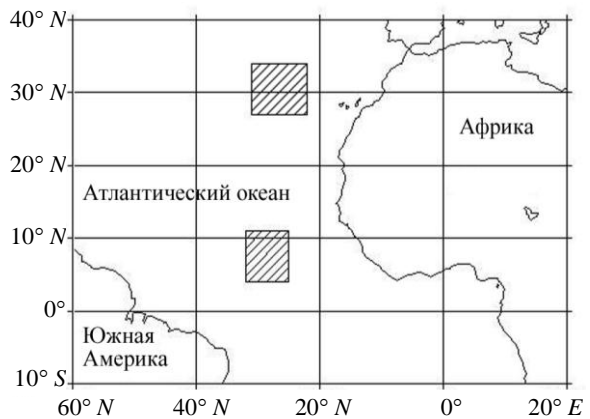


Рис. 1. Районы исследований

Результаты измерений множителя ослабления V для 3-см диапазона на расстояниях до 200 км приведены на рис. 2. Для сравнения сплошной линией показаны результаты расчета множителя ослабления для «стандартной» тропосферы, т. е. в отсутствие волновода.

Как видно из рис. 2, измеренные значения ослабления практически для всех случаев превышают значения, характерные для «стандартной» тропосферы. Для остальных диапазонов радиоволн экспериментально наблюдаемые уровни сигнала имеют значения, близкие к уровням «стандартной» тропосферы.

Регулярное наличие волновода испарения во время проведения эксперимента подтверждается результатами расчета его основных параметров по метеорологическим измерениям, которые в виде гистограмм приведены на рис. 3. Из них следует, что высота волновода испарения во время проведения эксперимента не превышала 20 м, а большая часть лежала в диапазоне 8...16 м.

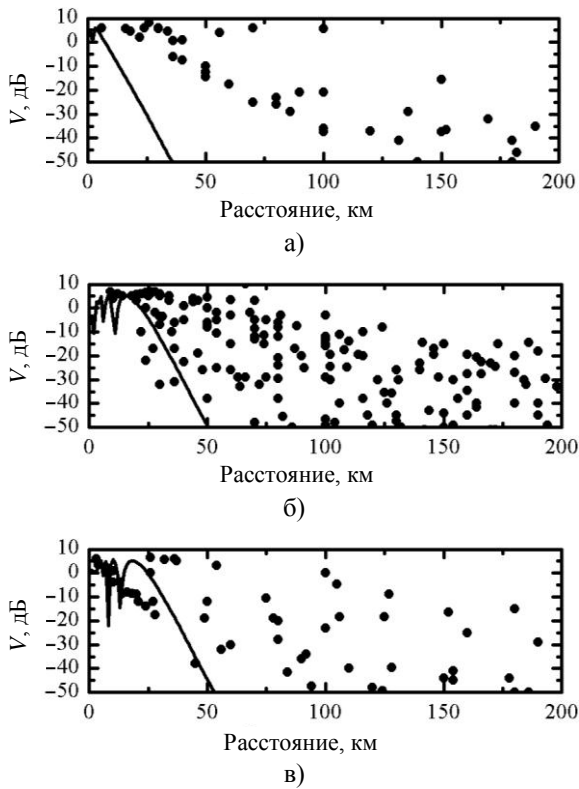


Рис. 2. Обобщенные результаты измерения множителя ослабления для трех комбинаций высот передающей и приемной антенн: а) – 4,5 м – 5,5 м; б) – 12 м – 17 м; в) – 12 м – 22,5 м

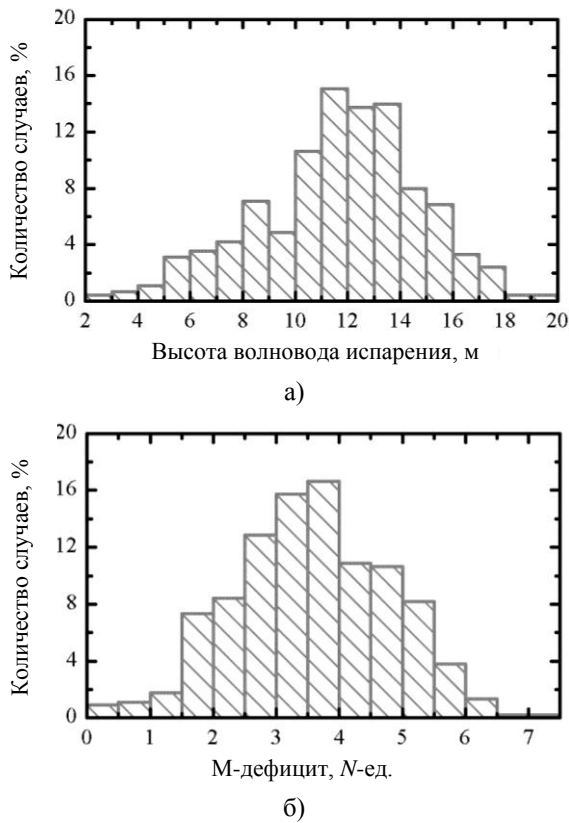


Рис. 3. Распределение высот волноводов испарения (а) и M-дефицита (б) во время эксперимента

Малая вероятность образования приподнятых неоднородностей, характерная для открытого океана, подтверждается и результатами аэрологического зондирования, проводившегося в ходе исследований. Таким образом, можно отметить, что для низкорасположенных антенн 3-см диапазона радиоволн основной механизм распространения – это волновод испарения.

3. Оценка высоты волновода испарения по дистанционной зависимости множителя ослабления. Как показывают результаты предыдущих исследований [1], в загоризонтной области дистанционная зависимость множителя ослабления при наличии пространственно однородного волновода испарения представляет собой спадающую линейную зависимость, наклон которой определяется высотой волновода испарения и его M-дефицитом (рис. 4). Причем при логарифмическом виде среднего профиля рефракции волновода зависимость от первого параметра существенно сильнее. Такой характер изменения уровня сигнала в загоризонтной области позволяет использовать в качестве характеристики всей дистанционной зависимости в этой области погонное затухание сигнала или некоторую эффективную высоту волновода, которая соответствует этому затуханию. Как отмечалось ранее, такая эффективная высота учитывает влияние целого ряда факторов, которые сложно оценить, используя простые измерения или расчеты.

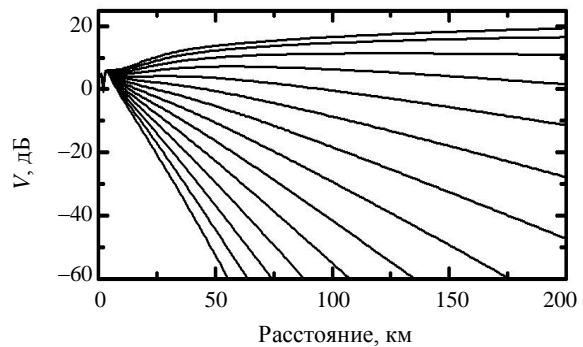


Рис. 4. Теоретическая зависимость множителя ослабления от расстояния для высот волновода испарения 3...16 м с шагом 1 м и высот расположения передающей и приемной антенн 4,5 и 5,5 м соответственно

При обработке имеющегося массива данных был использован следующий подход. Сначала были отобраны дистанционные зависимости, содержащие не менее трех точек измерений в загоризонтной области на расстояниях, не превышающих предельное значение, при котором доминирующую роль начинает оказывать тропосферное рассеяние на турбулентных флуктуациях коэффициента преломления. При этом максимальное расстояние было не более 200 км. Таким

образом, за весь период измерений было отображено 39 дистанционных зависимостей.

Далее для каждой измеренной зависимости множителя ослабления производился его расчет методом пошагового разбиения, описанным ранее, для высот волновода испарения H , изменяющихся в пределах от 2 до 16 м с шагом 0,2 м, а соответствующий им профиль рефракции определялся по формуле

$$M(z) = M(0) + 0,125(z - H \ln(z/z_0)), \quad (5)$$

где $M(z)$ – значение модуля приведенного коэффициента преломления на высоте z ; $M(0) = 330 N$ -ед.; $z_0 = 1,5 \cdot 10^{-4}$ м. При расчете учитывалось влияние морского волнения, степень которого определялась по скорости ветра, оцененной путем усреднения значений, измеренных за время расхождения судов.

Затем рассчитанные зависимости сравнивались с соответствующими экспериментальными данными, и по критерию минимума хи-квадрата определялась эффективная высота волновода испарения. На рис. 5 приведен пример результатов сопоставления экспериментальных данных и теоретически рассчитанной кривой, которая наилучшим образом аппроксимирует результаты измерения.

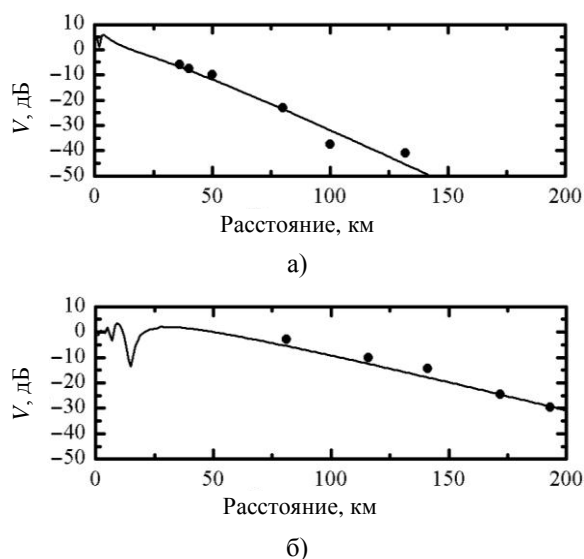


Рис. 5. Зависимость множителя ослабления от дистанции для высот расположения передающей и приемной антенн: а) – 4,5 м – 5,5 м; б) – 12 м – 17 м

Следующим этапом было определение высоты волновода испарения по метеорологическим данным [14]. Для этого для каждого набора метеорологических измерений рассчитывалась высота волновода, после чего осуществлялась интерполяция этих данных на время измерения множителя ослабления и далее производилось

усреднение высоты для всех точек одной дистанционной зависимости. Как правило, время расхождения судов до расстояний в 200 км составляло порядка 2–3 ч, и высоты волноводов испарения за это время существенно не менялись, т. е. их разброс был меньше, чем точность метода оценки высоты волновода по метеоданным (менее 2 м).

Далее проводилось сопоставление высот волноводов, полученных двумя различными методами. На рис. 6 приведены результаты сопоставления, выраженные через высоты волновода испарения, для всех 39 дистанционных зависимостей, где высота H_m получена по данным стандартных гидрометеорологических измерений, а высота H_p является эффективной высотой волновода испарения, при которой зависимость, полученная методом пошагового разбиения, наилучшим образом аппроксимирует экспериментальную дистанционную зависимость множителя ослабления. Треугольники, кружки и звезды соответствуют высотам расположения передающей и приемной антенн 4,5 и 5,5 м, 12 и 17 м, 12 и 22,5 м соответственно. Сплошная линия относится к ситуации, когда ослабление сигнала в загоризонтной области однозначно определяется только высотой волновода испарения. Штриховая линия – результат аппроксимации линейной зависимостью

$$H_m = aH_p + b, \quad (6)$$

где параметры регрессии a и b равны 0,73 и 4,88, а коэффициент корреляции составляет 0,55.

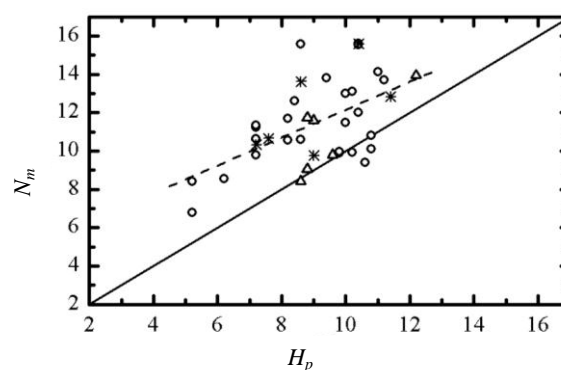


Рис. 6. Сопоставление высот волновода испарения, полученных по метеорологическим данным и по измеренным значениям множителя ослабления

Из рис. 6 видно, что высоты волновода испарения, полученные по метеоданным, превышают эффективные высоты волноводов, полученные по дистанционным зависимостям множителя ослабления. При этом для малых высот волноводов (высоты волноводов, полученные по метеоданным до 11 м) это отличие составляет порядка 3 м, для средних высот (11...14 м) – 2 м и

для больших высот (более 14 м) – 1 м. Этот наклон аппроксимирующей прямой, который можно охарактеризовать как переоценку малых высот волновода испарения и недооценку больших, вероятнее всего, обусловлен особенностями моделей, основанных на теории подобия Монина-Обухова, что отмечалось нами при сопоставлении высот волноводов, определенных по метеоданным, а также используя прямые рефрактометрические измерения [14].

Несмотря на то что приведены результаты с учетом влияния морского волнения, следует отметить, что этот фактор не оказывает существенного влияния на повышение точности оценки высоты волновода.

Выводы. Анализ экспериментальных данных подтверждает тот факт, что в тропической и субтропической областях Атлантического океана для низкорасположенных антенн основным механизмом распространения 3-см радиоволн на расстояния до 100...200 км является волновод испарения. Это подтверждается существенным превышением измеренного уровня сигнала над уровнями, характерными для «стандартной» атмосферы. Проведенное сопоставление эффективной высоты волноводов испарения, оцененной по измеренным значениям множителей ослабления, и высоты, определенной по стандартным гидрометеорологическим измерениям, показало, что влияние дополнительных факторов (флуктуации коэффициента преломления и т. д.) можно учесть, если в среднем уменьшать высоту волновода, получаемую по метеоданным, на 3 м для малых высот, на 2 м – для средних и на 1 м – для больших.

1. Кукушкин А. В. Загоризонтное распространение ультракоротких радиоволн над морем. (Обзор) / А. В. Кукушкин, В. Д. Фрейлихер, И. М. Фукс // Изв. вузов. Радиофизика. – 1987. – 30, № 7. – С. 811–848.
2. Anderson K. Radar measurements at 16.5 GHz in the oceanic evaporation duct / K. Anderson // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. – 1989. – 37, N 1. – P. 100–106.
3. Hitney H. Statistical assessment of evaporation duct propagation / H. Hitney, R. Vieth // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. – 1990. – 38, N 6. – P. 794–799.
4. Распространение ультракоротких радиоволн над морской поверхностью / С. Я. Брауде, В. К. Иванов, И. Е. Островский, И. М. Фукс // Радиофизика и радиоастрономия. – 1996. – 1, № 2. – С. 171–186.
5. Радиометеорологические параметры, определяющие условия распространения СВЧ-радиоволн над поверхностью океана, и методы их измерения / М. В. Белоброва, В. К. Иванов, А. Н. Кошель и др. // Радиофизика и радиоастрономия. – 1996. – 1, № 2. – С. 187–193.
6. Line-of-sight EM propagation experiment at 10.25 GHz in the tropical ocean evaporation duct / A. Kulesa, G. Woods, B. Piper, M. Heron // IEE Proc. Microwaves, Antennas and Propagation. – 1998. – 145, N 1. – P. 65–69.
7. Hitney H. V. Evaporation duct propagation and near-grazing angle scattering from a rough sea / H. V. Hitney // IGARSS '99 Proceedings. – Hamburg, 1999. – P. 2631–2633.
8. Anderson K. D. Rough Evaporation Duct (RED) Experiment / K. D. Anderson, R. A. Paulus // Proc. of the Battlespace Atmospheric and Cloud Impact on Military Operations Conference. – Fort Collins, 2000. – P. 1–11.
9. A comparison of microwave propagation models and evaporation duct height estimation techniques with actual near water atmospheric and radio data taken in North Queensland, Australia in May 2001 / A. Kerans, A. Kulesa, G. Woods et al. // Student Conference on Research and Development. – Shah Alam, 2002. – P. 120–125.
10. Claverie J. Evaluating Model Predictions of Low-Level Microwave Propagation Over the Ocean / J. Claverie, Y. Hurtaud // Battlespace Atmospheric and Cloud Impacts on Military Operations Conference (BACIMO 2004). – Monterey, 2004. – P. 1–10.
11. Yue P. Modeling evaporation duct effects on microwave propagation with experiment validation / P. Yue, M. Yuanliang // 7th Intern. Symp. on Antennas, Propagation and EM Theory, 2006. ISAPE '06. – Guilin, 2006. – V. 2. – P. 483–486.
12. Исследование ослабления радиоволн УКВ диапазона в районах Мирового океана / В. Л. Костина, И. М. Мыценко, А. Н. Роечко, С. И. Хоменко // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – X., 2007. – 12, № 3. – С. 532–538.
13. Мыценко И. М. Исследование распространения радиоволн сантиметрового диапазона при наличии волновода испарения / И. М. Мыценко // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – X., 2008. – 13, № 2. – С. 173–177.
14. Иванов В. К. Определение высоты волновода испарения по стандартным метеорологическим данным / В. К. Иванов, В. Н. Шалыпин, Ю. В. Левадный // Изв. РАН. Физика Атмосферы и Океана. – 2007. – 43, № 1. – С. 42–51.
15. Теоретические и экспериментальные исследования условий распространения радиоволн сантиметрового и дециметрового диапазонов в заданных районах Мирового океана: отчет о НИР «IV – Подстанция-УН» / ИРЭ АН УССР; рук. И. Е. Островский. – X., 1979. – 284 с.
16. Levy M. Parabolic Equation Methods for Electromagnetic Wave Propagation / M. Levy. – London: The Institution of Electrical Engineers, 2000. – 338 p.
17. Dockery D. An improved impedance-boundary algorithm for Fourier split-step solutions of the parabolic wave equation / D. Dockery, J. Kuttler // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. – 1996. – 44, N 12. – P. 1592–1599.
18. Miller A. R. New derivation for the rough surface reflection coefficient and for the distribution of sea wave elevations / A. R. Miller, R. M. Brown, E. Vegh // Proc. IEE. – 1984. – 131, N 2. – P. 114–116.

Yu. V. Levadnyi, V. K. Ivanov, V. N. Shalyapin

ABOUT RELATIONSHIP OF EVAPORATION DUCT HEIGHT AND MICROWAVE ATTENUATION IN OVER HORIZON

The analysis of the experimental data was carried out to find relationship between evaporation duct height, defined on bulk meteorological measurements, and attenuation of centimeter radio-waves in over horizon. It was shown that evaporation duct height reduction for tree meters for small evaporation duct height, two meters for medium height and one meter for large height increase accuracy of diagnostics of microwave propagation. It was also confirmed that in tropical and subtropical areas of the Atlantic Ocean for low antenna height an evaporation duct is one of the major propagation mechanisms for three centimeter radio waves.

Key words: atmospheric duct, radio wave propagation, numerical methods.

Ю. В. Левадний, В. К. Иванов, В. М. Шаляпін

ПРО ЗВ'ЯЗОК ВИСОТИ ХВИЛЕВОДУ
ВИПАРОВУВАННЯ ТА ПОСЛАБЛЕННЯ
САНТИМЕТРОВИХ РАДІОХВИЛЬ
У ЗАГОРИЗОНТНІЙ ОБЛАСТІ

Проведено аналіз експериментальних даних для з'ясування взаємозв'язку між висотою хвилеводу випаровування, що визначається за стандартними гідрометеорологічними вимірами, і послабленням сантиметрових радіохвиль

у загоризонтній області. Показано, що при зменшенні висоти хвилеводу випаровування на 3 м для малих висот, на 2 м для середніх та 1 м для великих підвищується точність діагностики поширення радіохвиль. Підтверджено, що в тропічних і субтропічних областях Атлантичного океану для низькорозташованих антен хвилевід випаровування є одним з основних механізмів поширення 3-см радіохвиль.

Ключові слова: атмосферний хвилевід, поширення радіохвиль, числові методи.

Рукопись поступила 02.04.10 г.