

УДК 621.371, 537.882

ВЛИЯНИЕ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ДЕКАМЕТРОВЫХ РАДИОВОЛН; МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

B. B. Иванов

На основе численного моделирования с использованием метода Монте-Карло проведено исследование влияния случайных неоднородностей области F ионосферы на распространение коротких радиоволн на наклонных односкачковых радиотрассах.

Выяснение качественной и количественной картины влияния случайных неоднородностей на ионосферное распространение радиоволн является актуальной задачей как в теоретическом, так и в практическом аспектах. Предложенная в [1] модель, описывающая один из типов неоднородностей среднеширотной и высокосиротной областей F ионосферы, может быть использована в качестве инструмента для проведения численных расчетов характеристик распространения радиосигналов на наклонных радиотрассах. Проведение таких расчетов в методе Монте-Карло позволило сформулировать ряд важных выводов о роли неоднородностей в рассматриваемых радиофизических эффектах, что и является содержанием настоящей работы.

Построенная в [1] модель описывает неоднородную структуру области F , обусловленную неоднородностью в горизонтальной плоскости потока ионизации, втекающего в ионосферу из вышележащих областей. Было показано, что, с учетом меняющейся с высотой поправки к горизонтальной скорости дрейфа плаэмы, неоднородности приобретают вертикальную структуру, определяемую ионосферными параметрами и зависящую от горизонтальных размеров нерегулярностей. В определенных приближениях, допустимых в области F , пространственное распределение неоднородностей может быть описано суперпозицией распространяющихся горизонтально волн плотности плаэмы с переменной по высоте амплитудой. Для отдельной Фурье-компоненты с длиной волны λ имеем для возмущений концентрации:

$$\Delta N_\lambda \sim \exp \left[-\frac{z-z_0}{2} \left(\frac{1}{H} + \frac{1}{H_i} \right) \right] \times \\ \times \left\{ \operatorname{Re} J_0 \left[(1+i) 2 H_m \sqrt{\frac{\nu_0 V_0 \pi}{\lambda D_0 \Omega_i}} \exp \left(-\frac{z-z_0}{H} \right) \right] - \right. \\ \left. - \operatorname{Im} N_0 \left[(1+i) 2 H_m \sqrt{\frac{\nu_0 V_0 \pi}{\lambda D_0 \Omega_i}} \exp \left(-\frac{z-z_0}{H} \right) \right] \right\}, \quad (1)$$

где z — высота, z_0 — опорный уровень в ионосфере (верхняя граница), H — шкала высот атомного кислорода в верхней атмосфере, H_i — плазменная шкала высот, J_0 и N_0 — функции Бесселя и Неймана, H_m — шкала высот молекулярного кислорода, v_0 , V_0 , D_0 — частота столкновения ионов, скорость дрейфа плазмы и коэффициент амбиполярной диффузии на опорном уровне z_0 , Ω_i — гирочастота ионов. С использованием асимптотического представления бесселевых функций для больших аргументов ниже уровня z_0 поле неоднородностей с оценочной точностью можно описать выражением:

$$\Delta N = \sum_{\lambda} S_{\lambda} \exp \left[-\frac{z - z_0}{2H_i} - a \sqrt{\frac{V_0}{\lambda}} \exp \left(-\frac{z - z_0}{H} \right) \right] \times \\ \times \cos \left[a \sqrt{\frac{V_0}{\lambda}} \exp \left(-\frac{z - z_0}{H} \right) - s \frac{2\pi}{\lambda} x - \phi_{\lambda} \right]. \quad (2)$$

Здесь S_{λ} — спектр горизонтальных масштабов неоднородностей на опорном уровне, a — коэффициент, соответствующий формуле (1), x — горизонтальная координата, s — знаковый множитель, принимающий значения ± 1 (будет пояснено далее), ϕ_{λ} — случайная, равномерно распределенная в интервале от 0 до 2π фаза. Сформулированные в (1) ограничения удовлетворяются для длин волн λ меньше или порядка 20 км. Модель описывает неоднородности плотности плазмы, представляющие собой в верхней части области F и внешней ионосфере вытянутые вдоль геомагнитного поля образования, которые с уменьшением высоты изгибаются в направлении вектора зависящей от высоты добавки к скорости дрейфа. Таким образом, линии равной фазы в представлении (2) выглядят так, как это схематически изображено на рис. 1, где плоскость $Z0X$ есть вертикальная плоскость, в которой лежит вектор добавки к скорости дрейфа. Здесь же показана проекция на плоскость $Z0X$ траектории распространения. В зависимости от знака добавочной скорости изгиб неоднородностей может быть ориентирован так, как на рис. 1 или противоположным образом — в сторону увеличения X . Эти два варианта реализуются двумя значениями множителя s в (2). Плоскость $Z0X$ в зависимости от направления дрейфа может составлять произвольный угол с плоскостью траектории. Далее будут проанализированы три случая: геометрия, соответствующая рис. 1 с излучателем в начале координат; ситуация с изгибом неоднородностей в противоположном направлении; случай, когда плоскость траектории распространения перпендикулярна плоскости $Z0X$, когда нет выделенного направления вдоль оси $0X$. Отметим особо, что изгиб неоднородностей обуславливает изменения с высотой амплитуд отдельных волн в спектре. В верхней части вертикальные градиенты неоднородностей малы, а интенсивность возмущений концентрации ве-

лика. С уменьшением высоты интенсивность падает, а градиенты увеличиваются. Такова основная особенность рассматриваемого здесь типа неоднородностей.

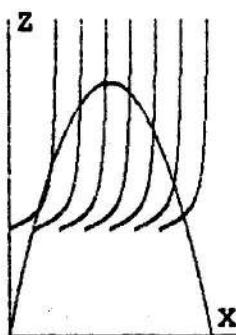


Рис. 1

При проведении численных расчетов модель неоднородностей комбинировалась с моделью регулярной ионосферы в виде слоя Чепмена:

$$N(z) = N_m \exp \left[1 - \frac{z - z_m}{H_l} - \exp \left(-\frac{z - z_m}{H_l} \right) \right], \quad (3)$$

где N_m — концентрация плазмы в максимуме слоя на высоте z_m , H_l — масштаб чепменовского слоя. В расчетах были использованы следующие типичные для ночной среднеширотной ионосферы параметры при выборе опорного уровня $z_0 = z_l = 350$ км: $H_i = 130$ км, $H = 50$ км, $H_m = 25$ км, $H_l = 130$ км, $a = 0.6 \text{ c}^{-1/2}$.

Отдельные реализации поля неоднородностей, используемые в методе Монте-Карло, формировались следующим образом. Генерировалась суммаризация пяти отдельных волн, длины которых λ задавались случайным образом равномерно в интервале от 4 до 20 км. Таким же образом задаются случайные фазы ϕ_l в диапазоне от 0 до 2π . Считалось, что спектр S_λ в этом диапазоне постоянен, а его величина, выражаемая в процентах от фоновой плотности на опорном уровне N_m , является входным параметром. Ограничение $\lambda < 20$ км связано с некоторыми приближениями, указанными в [1], а ограничение $\lambda > 4$ км обусловлено выбором разумного шага численного интегрирования лучевых уравнений. Кроме того, масштаб в несколько километров соответствует френелевскому размеру для рассматриваемых здесь трасс порядка 2000 км так, что учет более мелких неоднородностей в рамках используемого приближения геометрической оптики некорректен.

В основе дальнейшего анализа лежат расчеты характеристик распространения радиоволн, проводимые на базе численного решения уравнений, полученных методом характеристик в гамильтоновой постановке задачи [2]. Расчеты проводились в двумерном случае для достаточно коротких трасс, когда можно не учитывать сферичность Земли. Анализировались условия, когда рабочая частота вдвое превышала критическую частоту слоя $F2$. В каждой отдельной реализации описанным выше способом задавалось поле неоднородностей и рассчитывалось семейство траекторий, излученных под различными углами выхода в диапазоне от 18° до 28° , охватывающем области верхних и нижних лучей. Для каждого из расчетов с различными значениями входных параметров проводилось 16 испытаний с разными наборами случайных величин и определялись усредненные величины рассчитываемых характеристик. Базовым вариантом назван вариант, соответствующий геометрии рис. 1 (множитель $s = -1$) при интенсивности неоднородностей 12% ($S_\lambda = 0.12$ для всех длин волн).

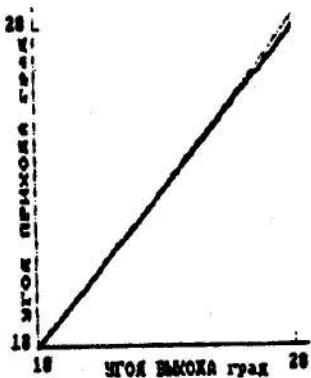


Рис. 2

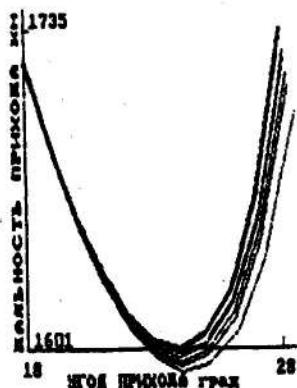


Рис. 3

Важнейшим выводом из результатов проведенного моделирования является тот факт, что, хотя средние значения возмущений концентрации плазмы в неоднородностях равны нулю, характеристики распространения радиоволн в ионосфере со случайными неоднородностями имеют систематические средние смещения относительно распространения в регулярной среде. Так, например, в подавляющем большинстве реализаций дистанционно-угловая характеристика оказывается смещенной в область меньших дальностей прихода (в особенности для верхних лучей) так, что граница мертвого зоны приема несколько приближается к излучателю. Наличие неоднородностей обусловливает асимметрию восходящего и нисходящего участков траектории распространения, вследствие чего углы выхода и прихода отличаются друг от друга. Рис. 2 иллюстрирует этот эф-

фект, рассчитанный для базового варианта. Видно, что в области верхних лучей средний угол прихода при наличии неоднородностей (тонкая линия) превышает угол прихода для регулярной ионосферы (жирная линия) на величину порядка градуса. Более существенно этот эффект проявляется в форме увеличения угла прихода на заданную дальность. На рис. 3 показаны зависимости средних углов прихода от дальности прихода для регулярной ионосферы и при наличии неоднородностей с интенсивностями 8%, 10%, 12%, 14%, 16% на опорном уровне — жирная и тонкие линии соответственно. Наличие неоднородностей оказывает заметное влияние и на групповое время распространения сигналов, что демонстрирует рис. 4. Две тонкие кривые здесь соответствуют усредненным групповым путем, рассчитанным для знакового множителя +1 и -1 в формуле (2). Из сопоставления кривых видно, что при ориентации, соответствующей значению $s = +1$, неоднородности несколько менее эффективны с точки зрения влияния на распространение радиоволн. Для интерпретации этого следует снова обратиться к рис. 1. Из геометрических соображений можно видеть, что при ориентации неоднородностей, соответствующей рисунку, область поперечных к траектории градиентов концентрации в неоднородностях больше на восходящем участке луча, а при противоположной ориентации — на нисходящей части. Поскольку одинаковые воздействия более значимы, если они реализуются в начале трассы, и именно поперечные градиенты возмущают траекторию, указанные различия становятся понятными.

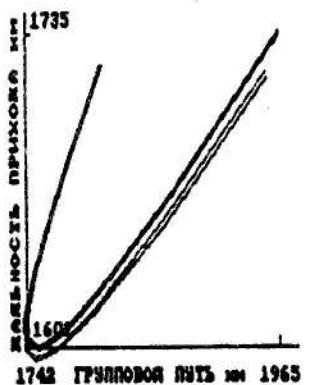


Рис. 4

Методика расчетов позволяет оценить и влияние неоднородностей на энергетику принимаемых сигналов. В рамках геометрической оптики величиной, пропорциональной интенсивности сигнала, является фактор фокусировки $(\sin \alpha, dD/d\alpha_t)^{-1}$, где D — дальность прихода, α_t — угол из-

лучения, α_r — угол прихода. На рис. 5 показаны фактор фокусировки в регулярной ионосфере для верхнего и нижнего лучей (жирные линии) и усредненные фокусировки при наличии неоднородностей при расчетах по базовому варианту. Можно видеть, что, за счет оттока энергии в область тени, в освещенной окрестности границы мертвых зоны интенсивность принимаемого сигнала уменьшается. Следует отметить, что все рассмотренные эффекты с практической точки зрения весьма невелики количественно, за исключением изменения углов прихода верхних лучей. Именно эта характеристика наиболее чувствительна к появлению неоднородностей на наклонных радиотрассах. Возможные увеличения углов прихода на несколько градусов могут быть надежно идентифицированы современными экспериментальными средствами и могут служить индикатором появления неоднородностей рассматриваемого типа в ионосфере.

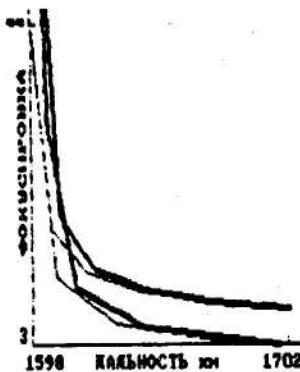


Рис. 5

Перечисленные эффекты выявлены для условий, когда в плоскости траектории распространения имелось выделенное направление — направление изгиба неоднородностей. Возможна, однако, ситуация, когда изгиб неоднородностей перпендикулярен плоскости лучей, и выделенного направления нет. В этом случае, как показали расчеты, указанные эффекты выражены значительно слабее (количественно — в несколько раз). Тем не менее, остаются систематические смещения усредненных характеристик относительно распространения в регулярной среде. При этом, однако, сохраняется равенство угла прихода углу выхода лучей, в отличие от выводов работы [3], где указывается на возможную асимметрию траектории при наличии в ионосфере случайных неоднородностей с мелкомасштабной (по отношению к толщине ионосферного слоя) вертикальной структурой. Здесь же указанный феномен выявлен для неоднородностей, вытянутых по вертикали. Эффект обусловлен высотным ходом амплитуд парциальных волн, формирующих поле неоднородностей.

Наряду с математическими ожиданиями отклонений характеристик распространения от значений, полученных для ионосферы без неоднородностей, были оценены дисперсии отклонений. Распределения отдельных реализаций оказались близкими к нормальнм, а среднеквадратичный разброс всех рассчитываемых параметров составляет величину порядка разности между средними значениями и значениями, полученными в отсутствие неоднородностей.

Необходимо специально отметить важную особенность, специфичную именно для данного типа неоднородностей. Рассмотрение дистанционно-угловых характеристик для отдельных реализаций позволяет утверждать, что при использовании в численном эксперименте указанной модели никогда не реализуется ситуация многолучевости — прихода на заданную дальность более чем двух (верхнего и нижнего) лучей. Обусловлено это сравнительно большими вертикальными размерами нерегулярностей и, наоборот, сравнительно малыми их горизонтальными масштабами. Численные расчеты показывают, что увеличение на порядок горизонтальных размеров приводит к существенному искажению формы дистанционно-угловой характеристики и многолучевости (3–5 лучей) "в большом". Уменьшение до величины порядка километров вертикальных масштабов приводит к появлению "ряби" на дистанционно-угловой характеристике — многолучевости "в малом". Вероятно, многолучевость "в большом" обязана своим происхождением крупномасштабным уединенным неоднородностям типа перемещающихся ионосферных возмущений, а за многолучевость "в малом" ответственны километровые волны в верхней нейтральной атмосфере, "отображающиеся" на ионосферную плазму. По-видимому, в реальной ионосфере комбинируются неоднородности всех трех видов, причем нерегулярности моделируемого здесь типа обуславливают относительно медленные (десятки секунд – минуты) флуктуации параметров принимаемых сигналов, в то время как многолучевость "в малом" формирует существенно более быстрые флуктуации. Такое разделение эффектов и понимание характера влияния неоднородностей тех или иных типов на распространение, по-видимому, окажется целесообразным в плане интерпретации экспериментальных данных и для решения практических задач ионосферного распространения радиоволн.

Автор выражает большую признательность Н. Т. Афанасьеву за полезное обсуждение работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов В. Б. // Изв. вузов. Радиофизика, 1990. Т. 33. № 9. С. 1033.
2. Кравцов Ю. Ф., Орлов Ю. И. Геометрическая оптика неоднородных сред. — М.: Наука, 1984.

3. Гусев В. Д., Васильева И. Г., Сонин А. А. В кн.: Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. — М.: Наука, 1988. № 80. С. 52.

Иркутский государственный
университет

Поступила в редакцию
10 марта 1993 г.

**THE INFLUENCE OF THE IONOSPHERIC IRREGULARITIES ON THE
PROPAGATION OF THE HF RADIO WAVES;
MATHEMATICAL SIMULATION**

V. B. Ivanov

On the base of the numerical simulation with the use of the Monte Carlo method it was carried out research of the influence of the random irregularities of ionospheric *F*-region on the propagation of HF radio waves at the oblique one-hop radio routes.