

УДК 621.396.24

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ГРАДИЕНТОВ В ИОНОСФЕРЕ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ПАРАМЕТРОВ КВ В ОКРЕСТНОСТИ МЕРТВОЙ ЗОНЫ

*В. Г. Галушко*

Приведены результаты триангуляционных измерений КВ радиосигналов в окрестности мертвой зоны, позволяющие определить скорость и направление движения каустики по поверхности Земли. Наблюдаемое отличие направления движения от азимута передатчика объясняется на основе модели наклонного ионосферного слоя. Показано, что использование данных об угле прихода радиоволны позволяет определить угол  $\psi$ , характеризующий величину горизонтального градиента в ионосфере.

При наклонном распространении КВ на частотах, близких к МПЧ, в переходные часы (заход или восход Солнца) часто наблюдается явление фокусировки поля на границе мертвой зоны [1, 3]. Огибающая сигнала при этом имеет ярко выраженный интерференционный характер, обусловленный распространением радиоволн двумя путями—нижним лучом и верхним, или лучом Педерсена.

В работе [1] измерения полей в окрестности каустики проводились с помощью остронаправленной антенны радиотелескопа УТР-2. В результате проведенного анализа кроме ионосферных параметров удалось определить и скорость  $V$  перемещения каустики по поверхности Земли. Это было сделано в предположении плоскостной ионосферы без учета горизонтальных градиентов. В этом случае граница мертвой зоны имеет форму окружности с центром в точке расположения передатчика, а вектор скорости  $V$  направлен вдоль радиотрассы.

Полученные таким образом данные интересно сравнить с результатами непосредственных измерений (например: триангуляционным методом) скорости и направления движения границы мертвой зоны. С этой целью в январе—марте 1983 года были проведены исследования КВ радиосигналов в окрестности мертвой зоны на трассе Москва—Харьков протяженностью 640 км. Эксперименты проводились на нескольких частотах от 10 до 12 МГц на заходе Солнца. Схема взаимного расположения приемных антенн, которыми служили три секции Т-образного радиотелескопа УТР-2 (северная—1, южная—2 и западная—3), представлена на рис. 1. Расстояния  $l$  между фазовым центром антенны С—Ю и фазовыми центрами трех секций одинаковы и составляют 815 м. Пунктиром изображен фронт интерференционных минимумов. Использование остронаправленной по углу места антенны С—Ю позволяло с высокой точностью ( $\sim 1^\circ$ ) определять зенитный угол радиоволны (подробное описание приемного комплекса дано в [2]).

На рис. 2 изображена запись сигналов, принятых пространственно разнесенными антеннами (номера каналов соответствуют номерам антенн). Вертикальные линии следуют через 8 с, время указано по МДВ. Видно, что огибающие сигналов с разных антенн с некоторой

временной сдвижкой  $\Delta t_{i-j}$  повторяют друг друга. Скорость  $V$  и угол  $\gamma$ , характеризующий ориентацию фронта интерференционных минимумов на поверхности Земли, определялись по формулам

$$\gamma = \arctg\{1 - 2\Delta t_{2-3}/\Delta t_{2-1}\}, \quad V = 2l \cos \gamma / \Delta t_{2-1}, \quad (1)$$

где  $\Delta t_{i-j}$  — время запаздывания соответствующего интерференционного минимума в  $i$ -м пункте относительно  $j$ -го. При получении выражений (1) предполагалось, что в пределах антенной системы фронт интерференционных минимумов можно считать плоским.

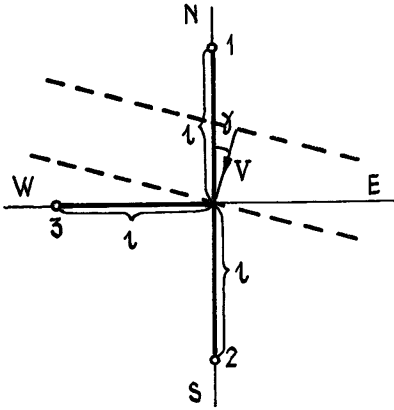


Рис. 1.

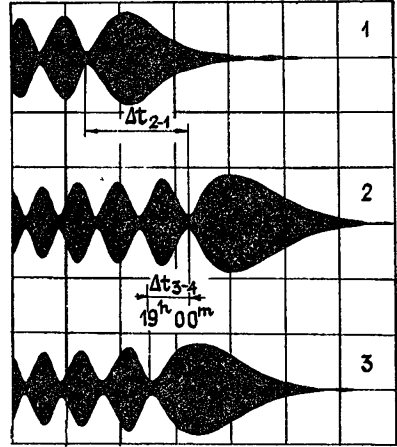


Рис. 2.

Результаты, вычисленные с помощью (1), сравнивались с данными, полученными при определении параметров параболического ионосферного слоя по однопунктовым измерениям с помощью остронаправленной антенны [1]. Оказалось, что разница в величинах скорости незначительна (5—10%), но направление движения иногда сильно

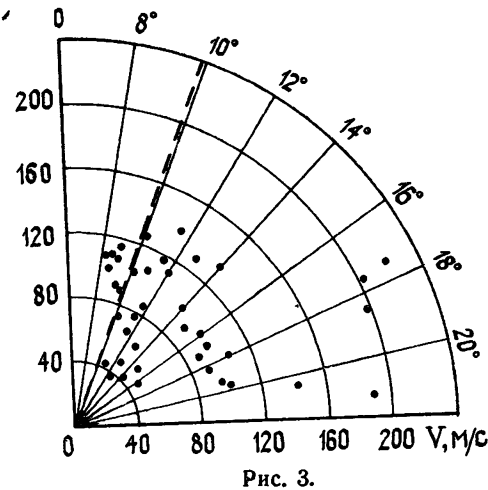


Рис. 3.

(на  $10-12^\circ$ ) отличается от азимута передатчика (на это указывается также в работе [3]). Иллюстрацией полученных с помощью (1) данных служит рис. 3. Результаты представлены в полярной системе координат, где каждой точке соответствует значение скорости  $V$  (радиус) и направление  $\gamma$ , отсчитываемое от севера ( $0^\circ$ ) по часовой стрелке. Здесь же пунктирной линией указано направление на передатчик. Видно, что на заходе Солнца существует регулярное отклонение на восток направления движения фронта интерференционных минимумов от азимута передатчика. Ниже показано, что этот эффект обусловлен горизонтальными градиентами электронной концентрации в переходной области ионосферы в окрестности терминатора.

Воспользуемся моделью наклонного ионосферного слоя, в которой градиент задается углом  $\psi$  между плоскостью Земли и границей плоскослойной ионосферы (см., например, [4]). Введем две системы координат  $x, y, z$  и  $x', y', z'$  (рис. 4а), у которых оси  $y$  и  $y'$  совпадают, ось  $z$  перпендикулярна плоскости Земли, ось  $z'$  перпендикулярна границе ионосферы. Ось  $x$  ориентируется вдоль направления градиента электронной концентрации. Начало координат, в котором находится передатчик, общее для обеих систем. На некоторой высоте  $z'_0$  в системе координат  $x', y', z'$  расположена граница ионосферного слоя с параболическим законом распределения электронной концентрации

$$N(z') = N_m (1 - (z'_m - z')^2 / y_m^2),$$

где  $N_m$  — электронная концентрация в максимуме слоя,  $z'_m$  — высота максимума слоя,  $y'_m$  — полутолщина слоя.

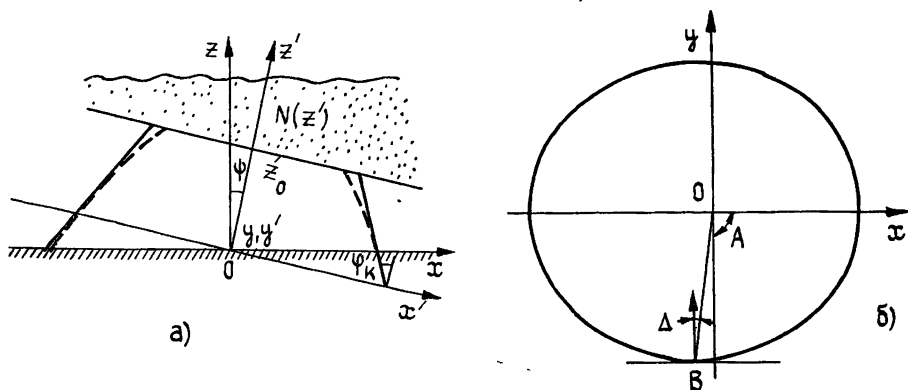


Рис. 4.

Каустическая поверхность представляет собой поверхность вращения с осью  $Oz'$ , образуемая которой вне ионосферного слоя описывается системой уравнений:

$$x' = (2z'_0 - z') \operatorname{tg} \varphi + y'_m \alpha \sin \varphi \ln [(1 + \alpha \cos \varphi) / (1 - \alpha \cos \varphi)]; \quad (2)$$

$$\frac{\partial x'}{\partial \varphi} = \frac{2z'_0 - z'}{\cos^2 \varphi} + y'_m \alpha \cos \varphi \ln \frac{1 + \alpha \cos \varphi}{1 - \alpha \cos \varphi} - \frac{2y'_m \alpha^2 \sin^2 \varphi}{1 - \alpha^2 \cos^2 \varphi} = 0, \quad (3)$$

где  $\varphi$  — угол падения луча на ионосферный слой,  $\alpha$  — отношение рабочей частоты  $f$  к критической частоте слоя  $f_{кр}$ . Оценки радиуса кривизны образующей каустической поверхности  $R$  по формуле [5]  $R = (\partial^2 x' / \partial \varphi^2) \cos \varphi$  (где  $\varphi = \varphi_k$  — решение уравнения (3)) для нашей дистанции дают значение величины  $R$  порядка нескольких тысяч километров. Так как это значительно больше длины образующей в свободном пространстве, примерно равной  $z'_0 / \cos \varphi_k$ , то в качестве каустической поверхности можно рассматривать поверхность конуса:

$$x'^2 + y'^2 = a^2 (b - z')^2, \quad (4)$$

где  $a = \operatorname{tg} \varphi_k$  ( $\varphi_k$  определяется из (3) при  $z' = 0$ ),  $b$  — координата вершины конуса, что значительно упрощает дальнейшие вычисления и окончательный результат. Образующие этого конуса изображены на рис. 4а сплошной линией. Пунктир — схематическое изображение образующей, определяемой уравнениями (2) и (3). Записав (4) в

системе координат  $x, y, z$  и положив  $z = 0$ , получим уравнение границы мертвой зоны, которое имеет вид

$$x^2(\cos^2\psi - a^2\sin^2\psi) + 2a^2bx \sin\psi + y^2 - a^2b^2 = 0. \quad (5)$$

При условии  $|\psi| < \pi/2 - \varphi_k$ , которое выполняется для всех отраженных от ионосферы лучей, (5) представляет собой уравнение эллипса. На рис. 4б изображен примерный вид границы мертвой зоны на поверхности Земли. Зная угол  $A$  между радиотрассой и осью  $x$ , вдоль которой направлен градиент, можно определить величину отклонения  $\Delta$  нормали к границе мертвой зоны в точке  $B$  (приемный пункт) от направления на передатчик:

$$\Delta = A - \pi/2 + \operatorname{arctg}(\partial y/\partial x)|_B. \quad (6)$$

Величина  $\Delta$  считается положительной при отклонении нормали против часовой стрелки, если смотреть на радиотрассу со стороны приемного пункта. Формула (6) справедлива для  $y < 0$ , но в силу симметрии относительно оси  $x$  при  $y > 0$  меняется только знак отклонения. Вычислив производную и перейдя к полярным координатам, из (6) получим

$$\Delta = A - \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \frac{a^2(\rho \cos A \sin \psi - b) \sin \psi - \rho \cos A \cos^2 \psi}{\sqrt{a^2(\rho \cos A \sin \psi - b)^2 - \rho^2 \cos^2 A \cos^2 \psi}}, \quad (7)$$

где  $\rho$  эквивалентно длине дистанции.

Величину  $b$  можно определить, с одной стороны, зная выражение для угла  $\varepsilon$  между образующей каустической поверхности и плоскостью Земли:

$$\sin \varepsilon = \frac{b \cos \psi}{\sqrt{\rho^2 + b^2 - 2\rho b \cos A \sin \psi}}.$$

Для наклонного распространения  $\varepsilon \neq (\pi/2 - \psi)$ , и тогда, учитывая, что  $b > 0$ , получим

$$b = - \frac{\rho \cos A \sin \psi \sin^2 \varepsilon}{\cos^2 \psi - \sin^2 \varepsilon} \left( 1 - \sqrt{1 + \frac{\cos^2 \psi - \sin^2 \varepsilon}{\cos^2 A \sin^2 \psi \sin^2 \varepsilon}} \right). \quad (8)$$

С другой стороны,  $b$  можно определить из (5):

$$b = \rho(\cos A \sin \psi + (1/a)\sqrt{\sin^2 A + \cos^2 A \cos^2 \psi}). \quad (9)$$

Приравняв (8) и (9), найдем  $a$ , подставив его вместе с (9) в (7), получим окончательное выражение для  $\Delta$ :

$$\begin{aligned} \Delta = A - \pi/2 + \operatorname{arctg} \{ & [(\cos^2 \psi - \sin^2 \varepsilon)(1 + \operatorname{ctg}^2 A \cos^2 \psi) \sin \psi \sin A] \times \\ & \times [\sqrt{\cos^2 A \sin^2 \psi \sin^4 \varepsilon + \sin^2 \varepsilon \cos^2 \psi - \sin^4 \varepsilon - \cos A \sin \psi \cos^2 \psi}]^{-1} + \\ & + \operatorname{ctg} A \cos^2 \psi \}. \end{aligned} \quad (10)$$

На рис. 5 приведена зависимость  $\Delta(\psi)$  при различных значениях  $\varepsilon$  при  $A = 100^\circ$ , что соответствует максимальному отклонению  $\Delta$ . Видно, что с увеличением  $\varepsilon$  для получения одного и того же отклонения требуется больший градиент. При  $\psi = 0$  отклонение  $\Delta$ , как и следовало ожидать, равно нулю.

Полученный результат справедлив не только для границы мертвой зоны, но и для фронтов интерференционных минимумов. Уравнение образующей поверхности интерференционных минимумов в системе координат  $x', y', z'$  можно записать в виде

$$x' = x'_i - n_i / (2 \cos \varphi [\pi^2 / (\lambda^2 R)]^{1/3}), \quad \partial x'_i / \partial \varphi = 0, \quad (11)$$

где  $x'_i$  определяется выражением (2),  $\lambda$  — длина волны,  $n_i$  — значение аргумента функции Эйри, соответствующее  $i$ -му интерференционному минимуму. (Здесь использовано выражение для амплитуды поля в окрестности каустики [5].)

Согласно оценкам разница углов наклона образующих (11) и (2), (3) к поверхности Земли для реально наблюдаемого в эксперименте числа интерференционных минимумов ( $i \sim 30$ ) не превышает ширины диаграммы направленности антенны С—Ю радиотелескопа УТР-2. Следовательно, можно считать, что значение угла  $\varepsilon$  одинаково как для каустической поверхности, так и для поверхности интерференционных минимумов. Таким образом, получено уравнение, позволяющее по известным  $\Delta$ ,  $A$  и  $\varepsilon$  определить величину горизонтальных градиентов ионосферы.

В соответствии с (10) были обработаны экспериментальные данные по измерению скорости и направления движения границы мертвой зоны по поверхности Земли с целью определения угла  $\psi$ , характеризующего горизонтальные градиенты электронной плотности в переходные периоды. Считалось, что направление градиента совпадает с нормалью к линии терминатора. Угол  $\varepsilon$  брался равным углу прихода нижнего луча для первого периода интерференционных биений (ошибка при этом не превышала  $1^\circ$ ) и, согласно проведенным оценкам, считался неизменным за время наблюдения одной фокусировки. Полученные величины углов наклона границы ионосферы в среднем составляют  $\sim 5^\circ$  (экстремальные значения достигают  $-10 \div -12^\circ$ ).

Таким образом, измерения поля КВ радиосигналов в окрестности мертвой зоны с помощью трех пространственно-разнесенных антенн и антенны с узкой диаграммой направленности в угломестной плоскости позволяют определить величину горизонтального градиента ионосферы.

Автор признателен П. В. Блюху за постановку задачи и внимание к работе, а также Ю. М. Ямпольскому за помощь при проведении измерений и обсуждение результатов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Блюх П. В., Галушко В. Г., Ямпольский Ю. М. Препринт ИРЭ АН УССР № 194. — Харьков, 1982.
2. Галушко В. Г., Рабинович Л. М., Ямпольский Ю. М. Препринт ИРЭ АН УССР № 182 — Харьков, 1981.
3. Таращук Ю. Е., Борисов Б. Б., Егоров Н. Е и др. — Геомагнетизм и аэрономия, 1982, 22, № 3, с. 505
4. Болдовская И. Г. — В сб.: Экспериментальные методы зондирования ионосферы. — М.: ИЗМИРАН, 1981, с. 127.
5. Budden K. G. Radio Waves in the Ionosphere. — Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1961, p. 185.

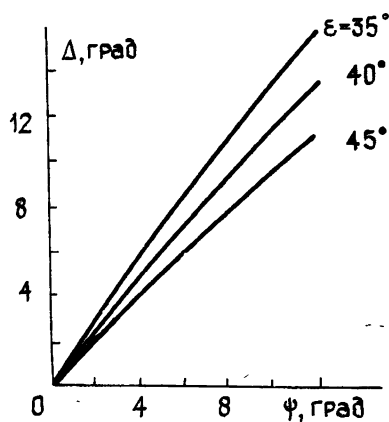


Рис. 5.

# DEFINITION OF HORIZONTAL IONOSPHERIC GRADIENTS FROM SHORT-WAVE RADIO MEASUREMENTS NEAR THE SKIP DISTANCE

V. G. Galushko

Results of short wave signal measurements at three reception sites near the skip distance are presented which allow evaluating the velocity and direction of motion of the caustic surface trace along the Earth surface. This direction has been found to be different from the transmitter azimuth. The departure is explained by the model of a slant ionospheric layer. From arrival angle data one can deduce the angular value  $\psi$  characterizing the magnitude of the horizontal density gradient in the ionosphere.

---

## И Н Ф О Р М А Ц И Я

ГЕОМАГНЕТИЗМ И АЭРОНОМИЯ, т. XXIII, № 6, 1983 г.

Аннотации статей, представляющих интерес для читателей «Радиофизики»

**Васьков В. В., Гуревич А. В.** Захват и поглощение плазменных волн в мелко-масштабных неоднородностях цилиндрической формы.

Исследуется интенсивность локального нагрева мелкомасштабных неоднородностей в экспериментах по воздействию мощного радионизлучения на верхнюю ионосферу.

**Вовк В. Я., Широков А. В.** Об использовании данных наклонного зондирования ионосферы для проверки расчетов траекторных характеристик на высокоширотных радиолиниях.

По экспериментальным данным наклонного зондирования ионосферы оценивается точность модельных расчетов траекторий коротковолновых радиосигналов как для среднеширотной, так и для полярной ионосферы. Выявлены ограниченные возможности существующих моделей для высокоширотных радиолиний. Указываются пути повышения точности модельных расчетов для высокоширотных радиолиний.

**Маркеева Ю. М., Молчанов О. А.** Особенности распространения ОНЧ-сигналов искусственного происхождения.

Приведены результаты приема сигналов от среднеширотного ОНЧ-излучателя ( $f = 15$  кГц,  $L = 2,6$ ) в магнитосопряженной области. Решаются вопросы о зоне приема магнитосферного сигнала и его статистических закономерностей, а также рассматривается вопрос о нелинейных свойствах распространения магнитосферного сигнала, возбуждающего триггерные излучения.

---