

УДК 550.388.2

ДИАГНОСТИКА НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРЫ ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ИОНОСФЕРЫ МЕТОДОМ ЗАГОРИЗОНТНОЙ КВ РАДИОЛОКАЦИИ С ПОМОЩЬЮ ЛЧМ ИОНОЗОНДА-РАДИОПЕЛЕНГАТОРА

Г.Г. Вертоградов, В.П. Урядов, Е.Г. Вертоградова

Представлены результаты первых экспериментов по исследованию неоднородной структуры экваториальной ионосферы на трассе Лейвертон (Австралия) – Ростов-на-Дону протяженностью 11790 км с помощью нового инструмента – ЛЧМ ионозонда-радиопеленгатора, позволяющего одновременно проводить измерения дистанционно-частотных (ДЧХ), амплитудно-частотных (АЧХ) и угловых в диапазоне частот (УЧХ) – т.е. ключевых характеристик ионосферного КВ канала во всем диапазоне частот прохождения радиосигналов на выбранных трассах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ЗАГОРИЗОНТНАЯ РАДИОЛОКАЦИЯ, ИОНОСФЕРА, ЛЧМ ЗОНДИРОВАНИЕ.

ВВЕДЕНИЕ

В ионосферных исследованиях большое внимание уделяется изучению особенностей образования и существования экваториального F-рассеяния (equatorial spread F - ESF). ESF – это сложное явление ночной экваториальной ионосферы со своей иерархией плазменных неустойчивостей, приводящих при благоприятных ионосферных и термосферных условиях к генерации неоднородностей электронной концентрации широкого спектра масштабов. Неоднородности экваториальной ионосферы оказывают существенное влияние на работу связных и навигационных систем, вызывая амплитудные и фазовые флуктуации радиосигналов.

Для изучения пространственных и временных характеристик неоднородностей F-области, ответственных за ESF используется различная техника, включая мерцания радиозвезд, трансэкваториальное распространение, мерцания радиосигналов ИСЗ, обратное рассеяние когерентных и некогерентных радаров, ракетные и зондовые измерения, свечение, измерения полного электронного содержания на основе трансionoсферного приема радиосигналов ИСЗ (см., например, [1] и цитируемую там литературу).

Ценные наблюдения были выполнены Rottger [2]. На трансэкваториальной трассе между Цумеб (Южная Африка) и Линдау (Германия) при зондировании на частоте 18,7 МГц кроме сигнала, принятого по дуге большого круга между передатчиком и приемником, были приняты дополнительные сигналы с задержками, составляющими периодическую структуру. Эти дополнительные сигналы были интерпретированы, как сигналы, рассеянные от дискретных областей F-слоя с неоднородностями, расположенными к западу и востоку от направления дуги большого круга между передатчиком и приемником. Обнаружение периодичности задержек рассеянных сигналов инициировало много теоретических работ, включая исследование роли атмосферных гравитационных волн (АГВ) и их связи с ESF. Одна из таких работ — это использование АГВ для модуляции фоновой электронной плотности для развития плазменных неустойчивостей [3]. При этом основной механизм неустойчивости связан с неустойчивостью Рэлея-Тейлора. Таким образом, гравитационные волны в нейтральной атмосфере рассматриваются как затравочный источник развития ионосферных неоднородностей, когда имеет место рост неустойчивости.

Несмотря на значительные достижения в исследованиях ESF, многие вопросы еще ждут своего решения. В частности, это относится к необходимости более полных и детальных исследований спусковых механизмов плазменных неустойчивостей, стабилизирующих и дестабилизирующих факторов развития неоднородностей различных масштабов, вплоть до метровых и их пространственно-временных вариаций в различных гео/ионосферных условиях.

В этой связи, значительный интерес представляет использование новой техники широкополосного наклонного ЛЧМ зондирования для исследования особенностей экваториальной ионосферы.

В докладе представлены результаты первых экспериментов по исследованию неоднородной структуры экваториальной ионосферы на трассе Лейвертон (Австралия) — Ростов-на-Дону протяженностью 11790 км с помощью нового, не имеющего в мире аналога, инструмента — ЛЧМ ионозонда-радиопеленгатора, позволяющего одновременно проводить измерения всех ключевых характеристик ионосферного КВ канала (ДЧХ, АЧХ и УЧХ) во всем диапазоне частот прохождения радиосигналов [4]. В эксперименте наш инструмент используется как загоризонтный ЛЧМ КВ радар бистатической конфигурации. Фактически, это развитие пионерской работы [2] на современном техническом уровне.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Впервые эксперимент по сверхдальному зондированию ионосферы с помощью ЛЧМ ионозонда — радиопеленгатора проводился в декабре 2009 г. — январе 2010 г. на трансэкваториальной трассе Лейвертон (28,6°S, 122,4°E), Австралия — Ростов-на-Дону. В ходе этого эксперимента были обнаружены аномальные сигналы и дана их интерпретация [5]. Было установлено, что часть аномальных сигналов обусловлена рассеянием радиоволн от Иранского нагорья и горного массива Гималаи. В вечернее и ночное время наблюдались аномальные сигналы с азимутов ~ 15–20° с задержкой ~ 10–12 мс относительно прямого сигнала. На основе сопоставления экспериментальных и расчетных данных было установлено, что такие аномальные сигналы связаны с рассеянием рикошетирующих и волноводных мод от ионосферных неоднородностей, расположенных в области диффузного выпадения заряженных частиц на северной стенке главного ионосферного провала ионизации, примыкающей к южной границе аврального овала.

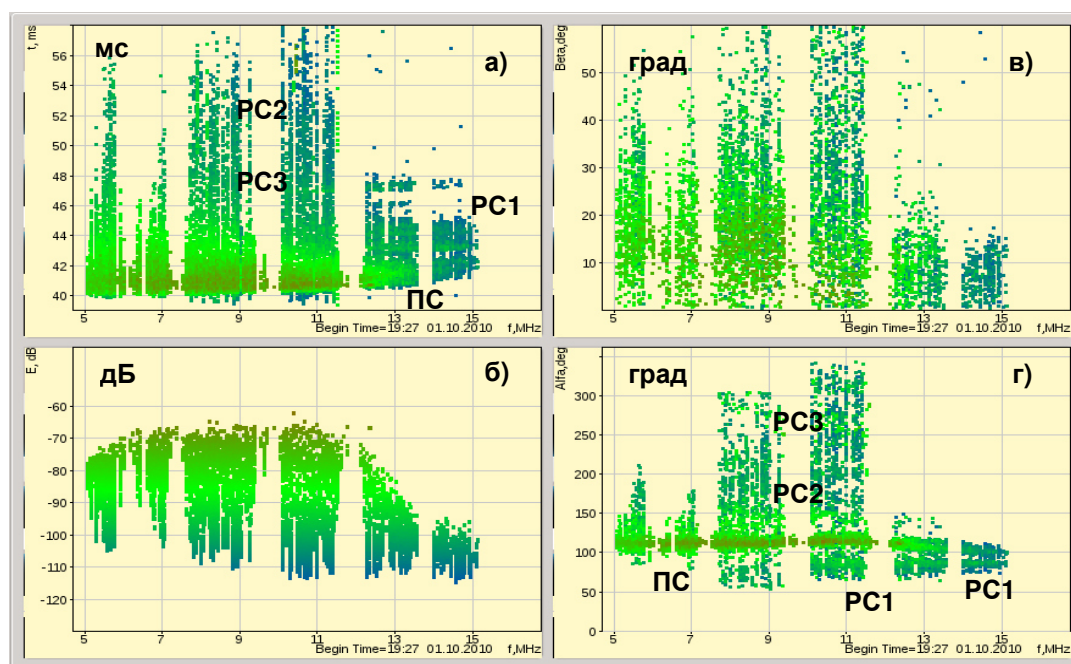


Рис. 1. ДЧХ – (а), АЧХ – (б), УЧХ (угол места – (в), азимут (г)) на трассе ЛЧМ зондирования Лейвертон (Австралия) – Ростов-на-Дону. 15:27 UT 01.10.2010 г.

ПС – прямой сигнал, PC1 – PC3 – рассеянные сигналы.

Эксперименты на трассе Лейвертон — Ростов-на-Дону с использованием ЛЧМ ионозонда — радиопеленгатора были продолжены в 2010-2012 гг. в условиях более высокой солнечной активности, когда были обнаружены аномальные сигналы, природа которых связана с рассеянием радиоволн на экваториальных неоднородностях. ЛЧМ передатчик в Лейвертон работает в диапазоне частот 5–30 МГц, скорость перестройки частоты составляет 125 кГц/с, излучение осуществляется через каждые 4 минуты. В Ростове-на-Дону прием осуществляется на антенную решетку, состоящую из 16 вертикальных 9-метровых штырей, расположенных на площадке размерами 100×100 м. Подробное описание работы ЛЧМ ионозонда-радиопеленгатора изложено в [4].

Характерный пример ионограммы на трассе Лейвертон — Ростов-на-Дону в вечернее время 15:27 UT 01.10.2010г. с регистрацией аномальных сигналов PC1, PC2 и PC3 (PC – рассеянный сигнал) показан на рис. 1. Сигнал PC2 занимает диапазон частот $\sim 5,2\text{--}11,5$ МГц, имеет большой разброс по задержкам от 42,5 до 56 мс и по азимутам от 126° до 208° . Сигнал PC3 занимает диапазон частот $\sim 7,8\text{--}11,3$ МГц и также имеет большой разброс по задержкам от 42 до 57 мс и по азимутальным углам прихода от 215° до 331° . Сигнал PC1 в виде трех треков наблюдался на частотах выше максимальной наблюдаемой частоты (МНЧ) прямого сигнала (МНЧ = 13,6 МГц), занимая интервал частот $\sim 9,8\text{--}15,1$ МГц. Хотя сигналы PC1 содержат диффузную составляющую, в основном эти сигналы локализованы как по задержкам: 42,6–43,8 мс, 44–45,2 мс и 46,8–48 мс, так и по азимутальным углам прихода: $85\text{--}91^\circ$, $81\text{--}84,7^\circ$ и $72\text{--}79^\circ$ соответственно.

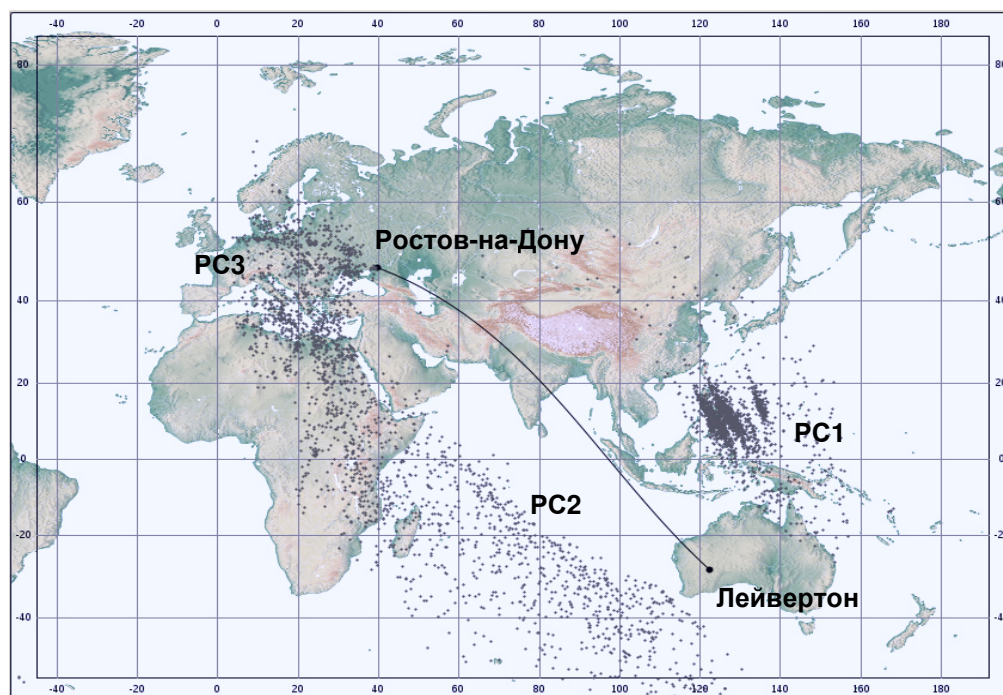


Рис. 2. Месторасположение областей, ответственных за рассеянные сигналы PC1–PC3 на трассе ЛЧМ-зондирования Лейвертон (Австралия) – Ростов-на-Дону 15:27 UT, 01.10.2010 г.

Для позиционирования областей, ответственных за появление рассеянных сигналов PC1–PC3, результаты измерений ДЧХ и УЧХ с учетом моделирования нанесены на физическую карту и показаны на рис. 2.

Как видно из рис. 2 сигналу PC2 соответствует обширная область, простирающаяся через Индийский океан от Австралии до Африки. Возможно, что сигнал PC2 связан с рассеянием радиоволн от взволнованной поверхности океана. Для более определенных выводов о природе сигналов PC2 необходимы дополнительные исследования в различных гео/ионосферных и метеорологических условиях.

Как видно из рис.2 область формирования сигналов PC3 приходится, в основном, на север Африки, Турцию, Балканы, Карпаты и Альпы. Мы полагаем, что основной вклад в сигналы PC3 вносит рассеяние радиоволн от земной поверхности, где в указанных регионах имеются горные возвышенности, способствующие более эффективному формированию поля рассеянных радиосигналов.

Новый интересный результат связан с регистрацией в вечернее и ночное время сигналов PC1, зона образования которых имеет вид квазипериодической структуры, вытянутой примерно в северо-южном направлении с пространственным квазипериодом между гребнями $\sim 400\text{--}700$ км (см. рис.2). Эта область приходится на район в окрестности геомагнитного экватора. Мы полагаем, что природа сигналов PC1 связана с рассеянием (отражением) радиоволн от перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ). Сигналы такого типа наблюдались на трансэкваториальной трассе наклонного зондирования между Цумб (19,25°S, 17,7°E, Намибия, Южная Африка) и Линдау (51,6°N, 10,1°E, Германия) [2]. В работе [6] рассматривается механизм формирования в экваториальной ионосфере квазипериодических структур, связанный с пространственным резонансом, когда величина вертикальной

составляющей фазовой скорости перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) совпадает со скоростью дрейфа плазмы $\sim [\vec{E} \times \vec{B}]$ в скрещенных магнитном и зональном электрическом полях. В этом случае происходит усиление волнового возмущения с последующим переходом в нелинейный режим, развитием неустойчивости и разрушением ПИВ. При этом локализация областей интенсивного рассеяния радиоволн проявляется, как ионосферный портрет ПИВ.

Таким образом, аномальные сигналы позиционируются с сигналами, рассеянными от квазипериодических структур электронной концентрации, расположенных в окрестности геомагнитного экватора. Такие квазипериодические структуры являются ионосферным откликом атмосферных гравитационных волн (АГВ). На существенную роль АГВ в инициировании экваториальных неоднородностей, сопровождающих явление ESF, указывают результаты многих экспериментальных и теоретических работ (см., например, [7–9] и цитируемую там литературу), где отмечается, что наличие градиента электронной плотности при ее модуляции волновым возмущением снижает порог развития плазменной неустойчивости Рэлея-Тейлора и приводит к образованию экваториальных неоднородностей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что наблюдаемые на трансэкваториальной трассе Лейвертон (Австралия) — Ростов-на-Дону аномальные сигналы с задержками $\sim 4\text{--}8$ мс относительно прямого сигнала, принимаемые с азимутов $\sim 70\text{--}90^\circ$, связаны с рассеянием радиоволн на квазипериодических структурах электронной концентрации экваториальной ионосферы с пространственным периодом $\sim 400\text{--}700$ км, расположенные в окрестности геомагнитного экватора. Азимут угла прихода прямого сигнала $\alpha = 115^\circ$.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что ЛЧМ ионозонд — радиопеленгатор является мощным инструментом как для исследования механизмов дальнего и сверхдальнего распространения радиоволн, так и для диагностики методом загоризонтной КВ радиолокации различных зон ионосферы Земли (экваториальной, среднеширотной и высокоширотной), получая в реальном времени информацию о состоянии ионосферы в планетарном масштабе, что открывает широкие перспективы для решения фундаментальных и прикладных задач в области физики ионосферы и распространения радиоволн на современном научно-техническом уровне.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 12-02-00177а.

THE DIAGNOSTICS OF INHOMOGENEOUS STRUCTURE OF THE EQUATORIAL IONOSPHERE BY OVER-THE-HORIZON HF RADIOLOCATION METHOD USING LFM IONOSONDE-RADIODIRECTION FINDER

G.G. Vertogradov, V.P. Uryadov, E.G. Vertogradova

In the ionospheric research a great attention is given to studying formation and existence features of equatorial spread F (ESF). The ESF is a complex phenomenon of night equatorial ionosphere with plasma instabilities hierarchy resulting at favorable ionospheric and thermospheric conditions for electronic concentration irregularities generation of wide spectrum of scales. Equatorial irregularities render essential influence at work of communication and navigating systems causing amplitude and phase fluctuations of radio signals.

In the report the research results concerning the inhomogeneous structure of equatorial ionosphere Laverton (Australia) - Rostov-Don path at distance 117900 km with help of new tool - LFM ionosonde-radiodirection finder are presented. This tool allows measuring all key parameters ionospheric HF channel (distance-frequency-characteristic (DFC), amplitude-frequency-characteristic (AFC) and angle-frequency-characteristic (AnFC)) in entire range of frequencies of radio signals passage. In experiment our tool is used as over-the-horizon LFM HF radar bistatic conditions.

Measurements were carried out in 2010-2012. During evening and night time for the given path abnormal signals were registered as several tracks at frequencies above maximum observed frequency (MOF) of a direct signal (NOF=13,6 MHz) occupying interval of frequencies $\sim 9,8\text{--}15,1$ MHz. Though abnormal signals contained a spreading component, basically these signals have been located on delays: 42,6–43,8 ms, 44–45,2 ms and 46,8–48 ms and azimuth angles of arrival: $85\text{--}91^\circ$, $81\text{--}84,7^\circ$ and $72\text{--}79^\circ$ respectively. Azimuth angle of arrival of a direct signal makes 115° .

Positioning of areas responsible for occurrence of scattering signals was carried out on the basis of modeling in view of DFC and AnFC measurements.

It is shown that area responsible for formation scattering signals looks like quasi-periodic structure extended approximately in north-southern direction with spatial quasi-period between crests ~400-700 km. This area falls at region in the vicinity of geomagnetic equator. We believe that nature of signals is connected with radio waves scattering from traveling ionospheric disturbances (TIDs). Such quasi-periodic structures are the ionospheric response of atmospheric gravitational waves (AGW). Results of many experimental and theoretical works indicate the essential role of AGW in equatorial irregularities initiation accompanying ESF phenomenon. It is marked that the modulation by wave disturbance of electronic density gradient reduces a threshold of development of the Rayleigh-Taylor plasma instability and results to the formation of equatorial irregularities.

KEYWORDS: OVER-THE-HORIZON HF RADIOLOCATION, IONOSPHERE, LFM SOUNDING.

ЛИТЕРАТУРА

1. Woodman R.F. Spread-F – an old equatorial aeronomy problem finally resolved? //Ann. Geophys. 2009, v.27, pp. 1915-1934.
2. Rottger J. Wave-like structures of large-scale equatorial spread-F irregularities//J. Atm. Terr. Phys. 1973, v.35, pp.1195-1206.
3. Kelley M.C., Larsen M.F., La Hoz C. Gravity wave interaction of equatorial spread-F: a case study// J. Geophys. Res. 1981, v.86, pp. 9087-9100.
4. Вертоградов Г.Г., Урядов В.П., Вертоградов В.Г., Кубатко С.В. Ионосферный зонд – радиопеленгатор// Патент № 2399062 РФ. Опубл. 10.09.2010г.
5. Вертоградов Г.Г., Урядов В.П., Вертоградова Е.Г., Понятов А.А. Сверхдальнее зондирование ионосферного канала с помощью ионозонда/пеленгатора с линейной частотной модуляцией сигнала//Изв. Вузов. Радиофизика, 2010, т.53, №3, с. 176-187.
6. Rottger J. The macro-scale structure of equatorial spread-F irregularities //J.Atm. Terr. Phys. 1976, v.38, pp. 97-101.
7. Hyssel D.L., Kelley M.C., Swartz W.E., Woodman R.F. Seeding and layering of equatorial spread F by gravity waves// J. Geophys. Res. 1990, v.95, pp. 17253-17260.
8. Kudeki E., Akgiray A., Milla M.A. et al. Equatorial spread F initiation: post-sunset vortex, thermospheric winds, gravity waves// J. Atm. Terr. Phys. 2007, v.69, pp. 215-223.
9. Fritts D.C., Vadas S.L., Riggins D.M. et al. Gravity wave and tidal influence on equatorial Spread F based on observations during the Spread F Experiment (Spread FEx)// Ann. Geophys. 2008, v.26, pp. 3235-3252.