

Крупномасштабные и мелкомасштабные неоднородности, генерируемые во время главной фазы магнитной бури 22 июня 2015 г.

ЯСЮКЕВИЧ Ю. В., ВАСИЛЬЕВ Р. В., ВЕСНИН А. М., ГЛОБА М. В., РАТОВСКИЙ К. Г.
Институт солнечно-земной физики СО РАН, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова 126а,
а/я 291
email: yasukevich@iszf.irk.ru

Введение

Интенсивные мелкомасштабные неоднородности оказывают значительное влияние на распространение радиоволн вследствие рассеяния сигнала [5]. Наиболее значительно эффекты рассеяния проявляются при размерах неоднородностей порядка первой зоны Френеля. Эффекты рассеяния приводят к значительным амплитудным мерцаниям радиосигнала, что в свою очередь приводит к ухудшению качества оценки фазы в таких системах, как глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), и даже срыву слежения за фазой сигнала в отдельных случаях [2].

Как правило, эффекты значительных мерцаний и срывов сопровождения фазы сигнала ГНСС согласно литературе наблюдались на высоких или приэкваториальных широтах, где эффективно работают механизмы генерации мелкомасштабных неоднородностей. В тоже время достаточно большое число работ указывает на проявление мелкомасштабных неоднородностей на средних широтах (см, например [3] и список цитируемых здесь работ).

Стоит отметить, что эффекты мелкомасштабных неоднородностей, например, в фазовых измерениях, проявляются значительно только для достаточно больших длин волн. В этой связи для мелкомасштабной части спектра ионосферных неоднородностей значительный интерес представляет комплексирование различных средств, одновременно осуществляющих оценку присутствия интенсивных неоднородностей.

В настоящей работе на основе экспериментального комплекса ИСЗФ СО РАН мы анализируем проявление мелкомасштабных неоднородностей во время магнитной бури 22 июня 2015 г., а также глобальную структуру генерируемых ионосферных возмущений.

Экспериментальные данные

В настоящей работе анализ мелкомасштабной структуры ионосферы был проведен на основе данных экспериментального комплекса ИСЗФ СО РАН (регион г. Иркутск, $\sim 52^\circ \text{N}$, 104°E), а также мировой сети приемников GPS/ГЛОНАСС. Для целей исследования мелкомасштабных неоднородностей мы использовали следующие инструменты:

1) Ионозонд вертикального зондирования DPS-4, позволяющий регистрировать явление F-рассеяния (F-spread). На рис. 1 приведен пример ионограммы 22 июня 2015 г., на которой можно видеть значительное размытие. Разрешение по времени – 15 мин. Наиболее значительное влияние на рассеяние сигнала оказывают неоднородности $\sim 1\text{-}3$ км.

2) Радар некогерентного рассеяния (РНР) [4]. Приёмные устройства РНР позволяют измерять мерцания амплитуды дискретных космических радиоисточников при прохождении ими сектора обзора радара. Наиболее значительное влияние на рассеяние сигнала в этом диапазоне оказывают неоднородности размером $\sim 400\text{-}800$ м.

3) Специализированный приемник сигналов GPS/ГЛОНАСС GPStation-6, позволяющий измерять интенсивность мерцаний амплитуды навигационного сигнала S4 и вариации фазы $\sigma\phi$ навигационного сигнала [3]. Приемник работал с разрешением по времени равным 1 мин. Наиболее значительное влияние на рассеяние навигационного сигнала и амплитудные мерцания оказывают неоднородности размером $\sim 100\text{-}300$ м.

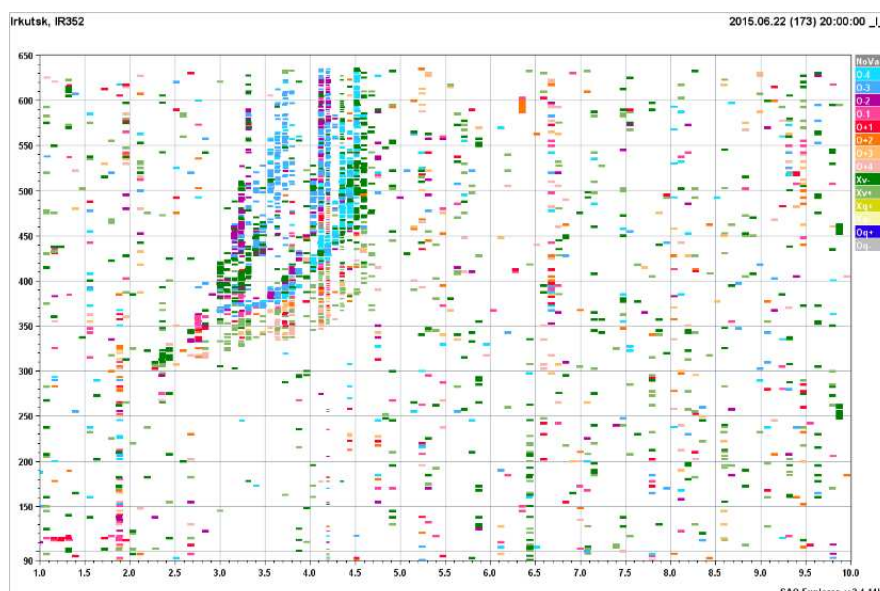


Рис. 1. Пример ионограммы вертикального зондирования 22 июня 2015 г. 20:00 UT.

Экспериментальные результаты

На рис. 2 представлены ширина частотного размытия ионограмм (F-рассеяние, верхняя панель), мерцания фазы навигационного сигнала $\sigma\phi$ по всем наблюдаемым спутникам (средняя панель) и мерцания радиосигнала “Лебедь-А” (нижняя панель). Данные представлены для 22 июня 2015 г. Рис. 3 показывает вариации индексов H-SYM и Vz (верхняя панель), плотности потока протонов (средняя панель), а также F-рассеяния (нижняя панель) за 22-23 июня 2015 г. (дни 173, 174).

Рис. 2 показывает, что в период времени с 19:45 до 21:15 UT регистрируется усиление F-рассеяния. Максимум наблюдается в $\sim 20:15$ UT. В $\sim 19:30$ UT регистрировалось кратковременное увеличение мерцаний фазы сигнала над фоновым уровнем. При этом увеличения мерцаний амплитуды навигационного сигнала нами отмечено не было. В районе 20 UT зарегистрированы мерцания сигнала радиостанции “Лебедь-А” проходящего через диаграмму направленности РНР.

На рис. 3 показаны геофизические индексы, характеризующие протекание бури за период 21, 22 июня 2015 г. (дни года 173, 174). На верхней панели даны вариации индекса H-SYM и Vz-компоненты межпланетного магнитного поля. На средней панели приведена плотность потока протонов (<http://www.swpc.noaa.gov/>). На нижней панели дана ширина частотного размытия ионограмм (F-рассеяния). После прихода ударной волны в 18:00 UT 22 июня 2015 г. и изменения направления Vz-компоненты ММП на южное, в 18:30 UT было зарегистрировано SSC и резкое снижение H-SYM индекса. При этом плотность потока протонов возросла с ~ 12 до ~ 52 см $^{-3}$. Локальный минимум H-SYM ~ -135 нТл зарегистрирован $\sim 20:15$ UT, когда регистрируется наиболее сильное F-рассеяние и мерцания радиостанции.

Мерцания амплитуды навигационного сигнала в диапазонах частот GPS/ГЛОНАСС 1200-1600 МГц в это время не превышало фоновое значения (данные здесь не приведены из-за ограниченного объема). При этом в $\sim 19:30$ UT регистрировалось кратковременное увеличение мерцаний фазы навигационного сигнала (рис. 2, средняя панель).

На рис. 4 представлены карты вариаций полного электронного содержания (ПЭС) для 4 моментов времени. Карты получены по данным мировых и региональных сетей приемников сигналов GPS/ГЛОНАСС. На картах в подионосферных точках лучей “спутник-

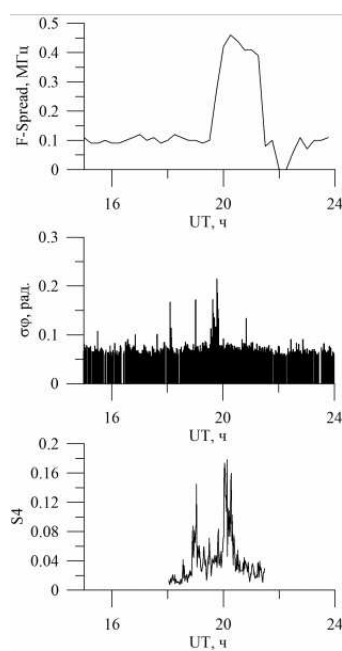


Рис. 2. F-рассеяние, флуктуации фазы навигационного сигнала и мерцания радиосточника «Лебедь-А» по данным РНР (сверху вниз)

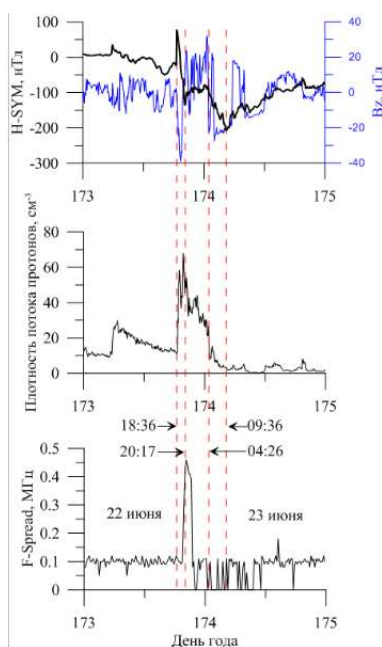


Рис. 3. Вариации индексов H-SYM и Vz, плотности потока протонов, а также F-рассеяния (сверху вниз)

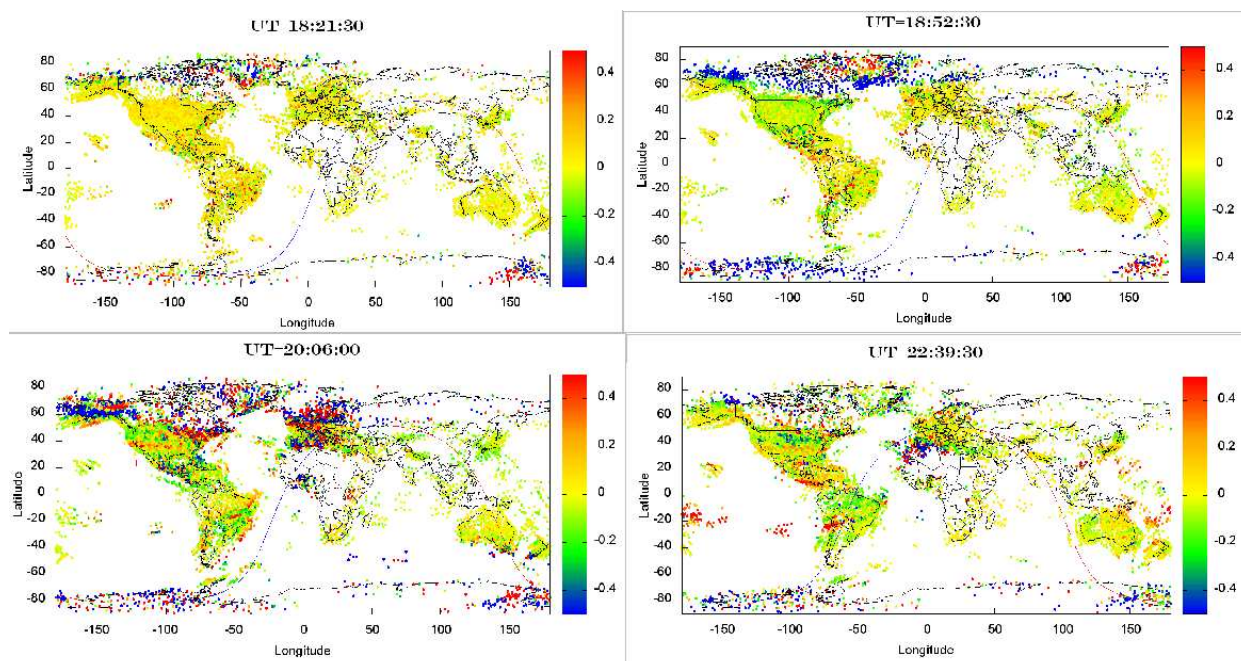


Рис. 4. Карты вариаций полного электронного содержания для времени 18:21:30, 18:52:30, 20:06:00, 22:39:30 UT

приемник” (высота 300 км) отмечены значения вариаций ПЭС, отфильтрованных в диапазоне периодов 2-20 мин. До начала бури в авроральной области всегда присутствуют спорадические возмущения не имеющие выраженного фронта и направления распространения. Во время начала магнитной бури около 18:50 UT в области аврорального овала южного и северного полушария возникают возмущения, охватывающие все долготные сектора. Эти крупномасштабные возмущения характеризуются отрицательным отклонением ПЭС от фона. Далее отрицательное возмущение сменяется положительным.

После этого формируется крупномасштабное перемещающееся ионосферное возмущение. Анализ динамической картины показывает, что крупномасштабные возмущения движутся в сторону экватора. В силу низкого пространственного разрешения карт вариаций ПЭС в регионе г. Иркутска затруднительно точно выделить время прихода крупномасштабного возмущения.

Здесь можно только ориентироваться на хорошо выделенный фронт в регионе Северной Америки и Европы, и делать экстраполяцию в регион г. Иркутска. Используя глобальные карты вариаций ПЭС, видно что возмущение достигло г. Иркутска около 20:06 UT. Это время совпадает с временем наблюдения мерцаний и F-рассеяния. Таким образом, инициатором процесса развития наблюдаемых мелкомасштабных неоднородностей ионосферы на средних широтах служит крупномасштабное возмущение, генерируемое в области высоких широт и распространяющееся в сторону экватора.

Заключение

Во время магнитной бури 22 июня 2015 г. были зарегистрированы интенсивные мелкомасштабные неоднородности на средних широтах. Полученные результаты указывают на то, что осуществлялась генерация достаточно интенсивных неоднородностей, вызывающих F-рассеяние на ионограммах ионозонда и интенсивные мерцания 150 МГц радиосигнала “Лебедь-А”, т.е. интенсивных неоднородностей с характерными размерами $\sim 0.5-3$ км в соответствии с зонами Френеля для метрового и декаметрового диапазона. Отсутствие амплитудных мерцаний в диапазоне частот GPS/ГЛОНАСС наряду с тем, что эффект

в данных DPS-4 выражен наиболее сильно, обусловлено степенным спаданием спектра интенсивности неоднородностей.

Также во время бури 22 июня 2015 г. зарегистрированы крупномасштабные неоднородности. В период $\sim 18:50$ UT синхронно в авроральной области северного и южного полушарий формируется “кольцо”, охватывающее все долготные сектора. Далее формируются перемещающиеся крупномасштабные возмущения, фронт которых имеет вид кольца и охватывает все долготные сектора (насколько позволяет судить сеть с неполным покрытием). Эти возмущения перемещаются в сторону экватора. Перемещающееся возмущение, генерируемое в северном полушарии имело большую амплитуду (по сравнению с возмущением в южном полушарии). При своем распространении оно пересекло экватор и достигло $\sim 40^\circ$ S.

Результаты анализа пространственной картины вариаций ПЭС указывают на то, что появление мелкомасштабных неоднородности обусловлены проникновением на средние широты крупномасштабных возмущений аврорального происхождения. На это же указывает отсутствие в это время высыпаний в области, где регистрировались мелкомасштабные неоднородности.

Мы выражаем благодарность сетям IGS, Unavco, Sonel за данные GPS/ГЛОНАСС. Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 15-05-03946, а также гранта № НШ-6894.2016.5 Президента РФ государственной поддержки ведущих научных школ РФ.

Литература

1. E.Astafyeva, Y. Yasyukevich, A. Maksikov, I. Zhivetiev. Geomagnetic storms, superstorms, and their impacts on GPS-based navigation systems // Space Weather. 2014. V. 12. P. 508–525, doi:10.1002/2014SW001072.
2. P. M. Kintner, B.M. Ledvina, E.R. de Paula. GPS and ionospheric scintillations // SPACE WEATHER, VOL. 5, S09003, doi:10.1029/2006SW000260, 2007.
3. S. Shanmugam, J. Jones, A. MacAulay A.J. Van Dierendonck. Evolution to Modernized GNSS Ionospheric Scintillation and TEC Monitoring // IEEE/ION PLANS 2012 – April 24-26, Myrtle Beach, SC, Session B2A
4. R.V. Vasilyev, D.S. Kushnarev, V.P. Lebedev, A.V. Medvedev, N.I. Nevidimov, K.G. Ratovsky. Perspectives of usage of Irkutsk incoherent scatter radar (IISR) as an imaging riometer and radio-heliograph // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2013; P. 105–106:273–280. DOI: 10.1016/j.jastp.2013.06.012
5. K. C. Yeh, C.H. Liu. Radio wave scintillation in the ionosphere // Proc. IEEE, 704, 324–360, 1982.source of ionospheric information since 1998, J. Geodesy, 2009, vol. 83, nos. 3–4, pp. 263–275.