

# Вариации ионосферных параметров, наблюдавшиеся во время мощных ураганов 2005 г. вблизи атлантического побережья США

А.Б. Ишин<sup>1</sup>, С.В. Воейков<sup>1</sup>, Н.П. Перевалова<sup>1</sup>, А.В. Зализовский<sup>2</sup>,  
А.А. Сопин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт Солнечно-Земной физики СО РАН  
Россия, 664033, Иркутск-33, а/я 291*  
<sup>2</sup>*Радиоастрономический институт НАНУ  
Украина, 61002, Харьков, Краснознаменная, 4  
E-mail: [ishin@iszf.irk.ru](mailto:ishin@iszf.irk.ru)*

В данной работе проведен анализ данных ионозондов и вариаций полного электронного содержания (ПЭС), полученных по данным наземных станций GPS в регионе (10°S – 40°N; 260° – 290°E) в период сентябрь-октябрь 2005 г., с целью поиска возможных ионосферных проявлений мощных ураганов Rita (18 – 26 сентября) и Wilma (16-25 октября). В районе действия ураганов было выявлено усиление вариаций ПЭС в диапазоне периодов 2-20 мин.

**Ключевые слова:** ураганы, GPS, ионосфера, ПЭС.

## Введение

Доминирующую роль в формировании, строении и динамическом режиме ионосферы играют солнечная и геомагнитная активность. Однако в вариациях ионосферных параметров присутствуют закономерности, которые невозможно объяснить, полагая, что ионосфера изолирована от нижележащих атмосферных слоев [1]. Основным физическим механизмом взаимодействия между ионосферой и нижними слоями атмосферы принято считать распространение снизу вверх планетарных (периоды несколько дней), приливных (периоды несколько часов) и акустико-гравитационных волн (АГВ, периоды 10-150 мин).

В литературе неоднократно высказывалось предположение, что мощные метеорологические возмущения могут служить источником электрических полей и АГВ [1-5]. На высотах ионосферы АГВ могут проявляться в виде перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ). Детектирование ПИВ, связанных с метеорологическими явлениями, главным образом, проводилось по данным измерений доплеровского сдвига частоты КВ радиосигнала или фарадеевского вращения плоскости поляризации сигнала геостационарных ИСЗ [6, 7].

В последнее десятилетие активно развивается технология дистанционной диагностики ионосферы с помощью сигналов спутниковой радионавигационной системы GPS [8]. В настоящей работе эта технология используется для поиска возможных ионосферных проявлений ураганов 2005 г. в США.

## Методика обработки данных и общие сведения об эксперименте

Для поиска возможных ионосферных эффектов был выбран регион с высокой плотностью размещения приемников GPS – восточное побережье США. В 2005 г. в этом регионе действовали мощные ураганы Katrina, Rita, Wilma. Во время самого интенсивного из них (урагана Katrina) наблюдалась сильная магнитная буря ( $K_p > 8$ ). Эффекты, связанные с магнитной бурей, оказываются значительно сильнее ожидаемых воздействий урагана [9]. Тем не менее, в работе [5] показано наличие связи между тропосферой и ионосферой, выражающееся в повышении

электронной концентрации в максимуме слоя F ионосферы над центром урагана, которое вызывается проникновением электрического поля от пространственного электрического заряда, формирующегося в верхней части урагана в результате усиления конвекции. В настоящей работе для исследования нами выбраны ураганы Rita и Wilma. Интенсивность этих ураганов была ниже, чем урагана Katrina, но они действовали при значительно более спокойной геомагнитной обстановке: индекс Kp только 2 раза достигал значения 5, а во время основной фазы действия ураганов не превышал 3.

Для эксперимента были выбраны станции GPS, расположенные близко к зоне действия ураганов (рис. 1). Временные ряды вариаций ПЭС, полученные на выбранных станциях GPS с шагом 30 сек, фильтровались в диапазонах периодов 2-10 и 2-20 мин (методика обработки данных подробно описана в работе [8]). Каждый отдельный спутник находится в зоне радиовидимости станции GPS не более 6-7 часов. Для получения непрерывного набора данных в течение нескольких дней последовательно стыковались ряды измерений ПЭС для спутников, видимых при наиболее высоких углах места. Несмотря на то, что ряд формировался по данным разных спутников, он может быть использован для оценки изменений амплитуды вариаций ПЭС.

С целью поиска отклика на ураганы использовались также данные станций вертикального радиозондирования ионосферы (рис. 1): BC840 (BOULDER (40.00°N, 105.30°W)), DS932 (DYESS (32.40°N; 99.80°W)), EG931 (EGLYN (30.40°N; 86.80°W)), MHJ45 (MILLSTONE HILL (42.60°N; 71.50°W)), WP937 (WALLOPS IS (37.90°N; 75.50°W)).

Статистическая обработка данных ионозондов проводилась путем оценки и дальнейшего сравнения средневзвешенных значений параметров ионосферы за сутки или часть суток. Средневзвешенное значение параметра определялось по формуле:

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^N P_i W_i}{\sum_{i=1}^N W_i},$$

где  $P_i$  - численное значение усредненного ионосферного параметра на  $i$ -м ионозонде,  $W_i$  - весовая функция для  $i$ -го ионозонда. «Вес» каждого ионозонда в усреднении определялся исходя из его расстояния от центра урагана: чем расстояние меньше, тем вес параметра больше. Использовалась весовая функция вида:

$$W_i = \frac{1}{D_i},$$

где  $D_i$  - среднее за данные сутки расстояние между центром урагана и  $i$ -м ионозондом.

## Результаты анализа данных GPS

При исследовании возможного влияния на ионосферу урагана Wilma, использовались данные трех станций GPS: KYW1, ELEN, GUAT (рис. 1б). Для урагана Rita – двух станций: KYW1 и FLIU (рис. 1а).

Результаты, полученные по данным, зарегистрированным во время ураганов Wilma и Rita для указанных станций, представлены на рис. 2 и рис. 3, соответственно. Во время действия урагана Wilma на всех трех станциях в 290-295 дни наблюдается увеличение средней амплитуды вариаций ПЭС  $dI(t)$  от 0.03 до 0.1 TECU ( $1\text{TECU} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$ ). При этом скорость ветра увеличивалась от 50 до 270 км/час (серая кривая). Это увеличение не могло быть связано со слабым возмущением геомагнитной обстановки в 290 день, так как из рис. 3а видно, что в 280 и 281 дни обстановка была более возмущенной, но аналогичного увеличения амплитуды вариаций ПЭС не наблюдалось.

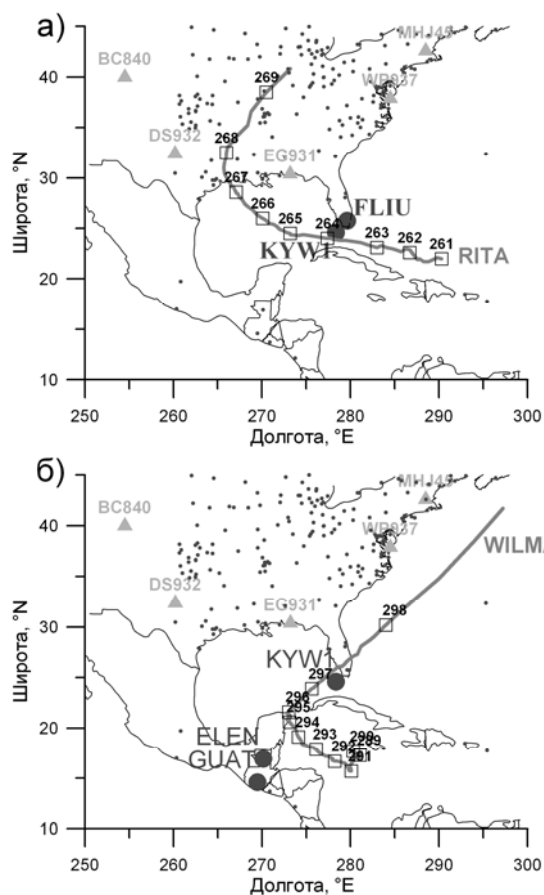


Рис. 1. Общая геометрия эксперимента. Ураган Rita – а), ураган Wilma - б). Линией обозначена траектория движения ураганов, квадраты на линии – положение центра урагана в 00:00 UT соответствующего дня, числом указан номер дня в году. Точки – станции GPS в регионе. Треугольники – станции вертикального радиозондирования ионосферы

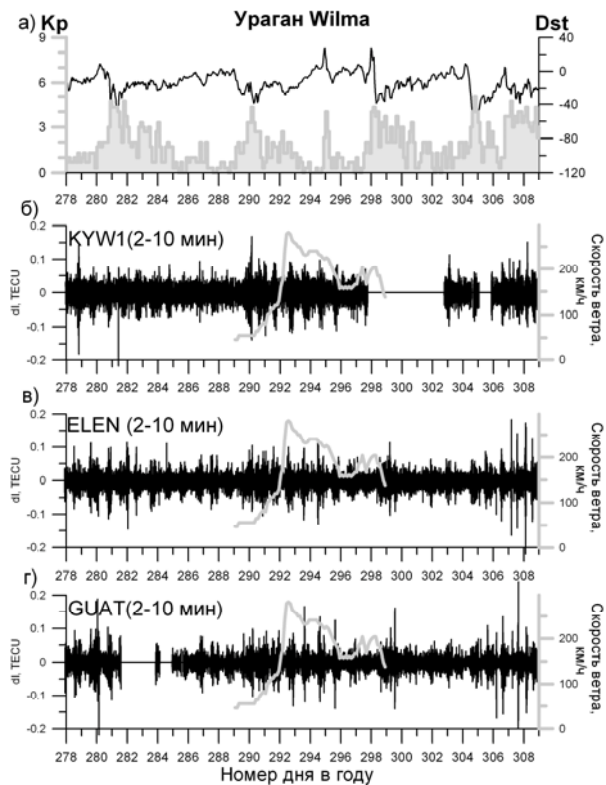


Рис. 2. Значения индексов Kp (серая линия) и Dst (черная линия) (а). Вариации ПЭС на станциях KYW1 (б), ELEN (в), GUAT (г) (черная тонкая линия) и скорость ветра в урагане Wilma (серая линия) (б, в, г)

Кроме того, увеличение амплитуды вариаций ПЭС в 291-294 дни происходит на фоне спокойной геомагнитной обстановки (размах колебаний индекса Dst не превышал 40 нТл). Именно в эти дни ураган Wilma находится в максимальной фазе своего развития (рис. 2).

Во время урагана Rita также наблюдалось увеличение амплитуды вариаций ПЭС (рис. 3) на обеих рассматриваемых станциях. Эти станции расположены значительно ближе к траектории урагана Rita, чем станции, данные которых рассматривались при анализе эффектов урагана Wilma. В 263, 264 дни центр урагана находился практически над анализируемыми станциями. Именно этим, по нашему мнению, может объясняться мощное увеличение амплитуды вариаций ПЭС в эти дни. Геомагнитная обстановка в 263, 264 дни была очень спокойной. Индекс Kp не превышал 3, а перепад значений индекса Dst составил менее 30 единиц.

### Эффекты, наблюдаемые на ионозондах

Сравнивались параметры спорадических E слоев (Es) при низкой и высокой активности ураганов. Условная граница между «низкой» и «высокой» активностью была выбрана равной 35 м/с по максимальному продолжительному ветру и 960 мБар по атмосферному давлению в центре урагана.

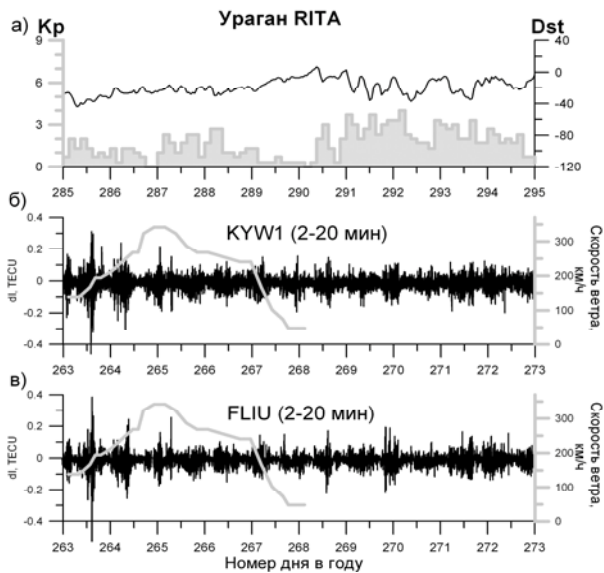


Рис. 3. Значения индексов Kp (серая линия) и Dst (черная линия) (а). Вариации ПЭС на станциях KYW1 (б), FLIU (в) (черная тонкая линия), и скорость ветра в урагане Rita (серая линия) (б, в)

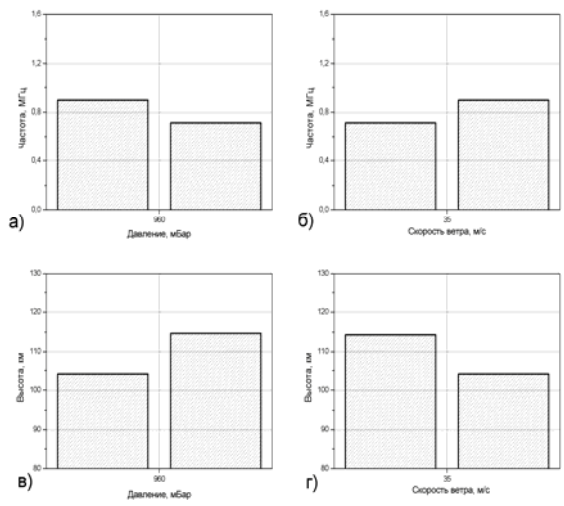


Рис. 4. Зависимости средневзвешенных критических частот (а, б) и высот (в, г) спорадических E слоев в ночное время от приземного давления (а, в) и максимальной скорости продолжительного ветра (б, г) урагана Rita

При анализе усредненных за сутки ионосферных параметров существенного воздействия тропосферного фактора выявить не удалось.

При рассмотрении реакции ночной ионосферы (рассмотрен временной интервал 00–12 часов LT) было обнаружено, что параметры спорадических E слоев меняются в зависимости от активности урагана одинаковым образом для обоих рассмотренных циклонов. С ростом активности урагана значения критических частот слоев Es увеличиваются, а средние высоты Es уменьшаются.

Усредненные численные параметры Es в окрестности урагана Rita приведены на рисунке 4. На каждой панели рис. 4 указана граница «низкой» и «высокой» активности урагана. Слева от границы даны значений параметров при «низкой» активности, справа – при «высокой». С падением давления в центре (рис. 4а, в) и ростом скорости ветра в циклоне (рис. 4б, г) усредненная критическая частота Es растет (рис. 4а, б), а высота Es уменьшается (рис. 4в, г).

Таким же образом ведут себя средневзвешенные критические частоты и высоты Es в окрестности урагана Wilma (рис. 5).

При прохождении ураганов было отмечено необычное поведение критической частоты слоя Es (рис. 6). В период с 18 по 26 сентября 2005 г. (дни с 261 по 269) на ионозонде BC840 слой Es в ночное время наблюдался только 24 сентября (267 день), при этом зарегистрированы колебания критической частоты Es (рис. 6а). Именно 24 сентября ураган Rita пересек береговую линию и начал быстро разрушаться (рис. 1а).

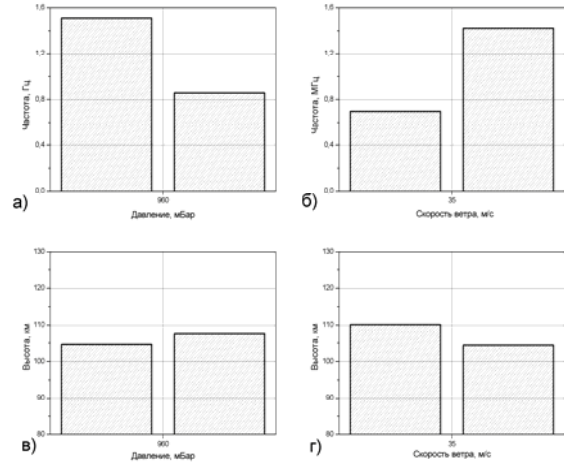


Рис. 5. Зависимости средневзвешенных критических частот (а, б) и высот (в, г) спорадических E слоев в ночное время от приземного давления (а, в) и максимальной скорости продолжительного ветра (б, г) урагана Wilma

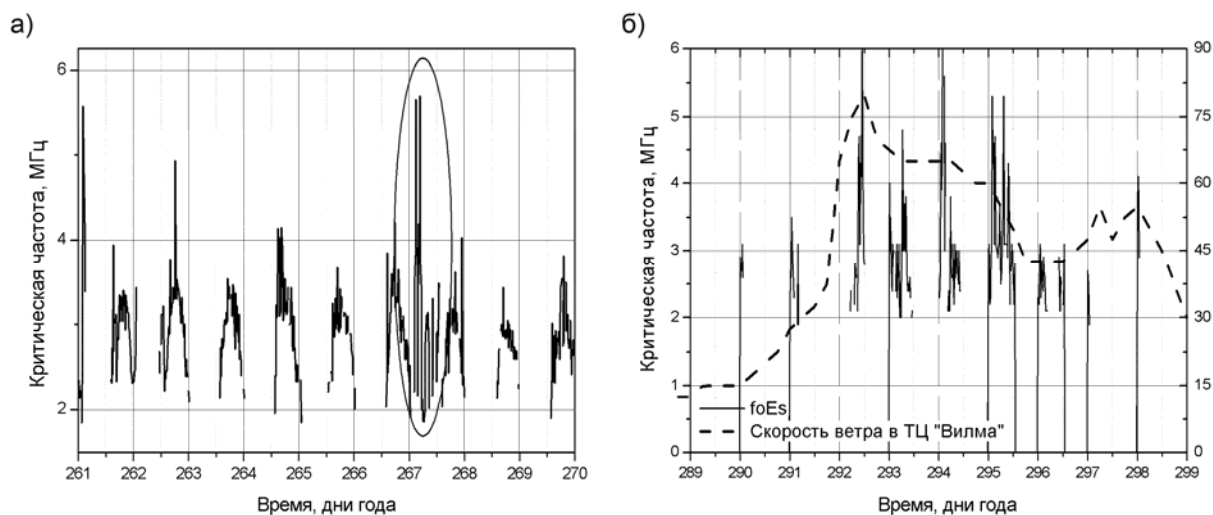


Рис. 6. Вариации критической частоты слоя Es 18-26 сентября 2005 г. на ионозонде BC840 – а) и 16-25 октября 2005 г. на ионозонде DS932 – б)

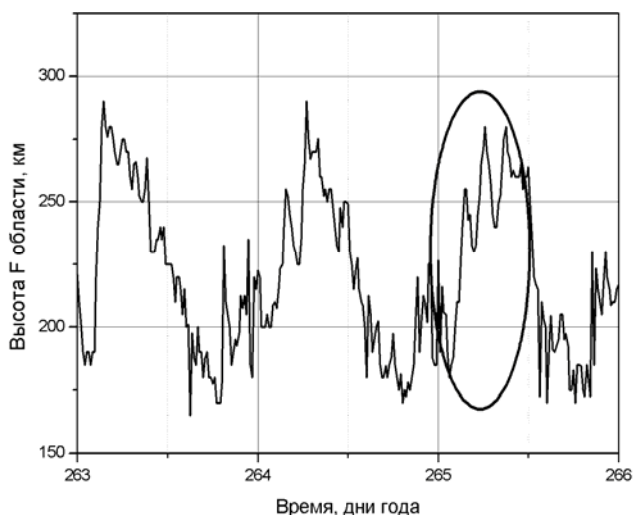


Рис. 7. Вариации действующей высоты F области 20-22 сентября 2005 года на ионозонде DS932

На рис. 6б приведены вариации критических частот слоя Es, измеренные на ионозонде DS932, и скорость ветра в урагане Wilma (пунктирная кривая). Можно отметить, что с увеличением скорости ветра в урагане увеличивается и критическая частота слоя Es.

На ионозонде DS932 ночью 22 сентября (день 265) отмечались квазипериодические вариации высоты F области (рис. 7), которые, возможно, были вызваны распространением АГВ. Отметим, что в это время ураган Рита достиг своего максимального развития, его центр находился на расстоянии порядка 1500 км от ионозонда, давление в центре составляло 897 мБар.

## Выводы

Анализ абсолютных значений амплитуды вариаций ПЭС по данным станций GPS в регионе действия ураганов Wilma и Rita выявил усиление вариаций ПЭС в диапазонах периодов 2-10 и 2-20 мин во время действия ураганов по сравнению с предыдущими и последующими днями. Ураганы наблюдались в спокойных геомагнитных условиях, поэтому увеличение амплитуды вариаций ПЭС нельзя связать с возмущением геомагнитной обстановки. Другого источника повышения интенсивности вариаций ПЭС выявить не удалось. Можно сделать предположение, что зарегистрированные усиления амплитуды вариации ПЭС связаны с действиями ураганов.

Во время урагана Wilma отмечено увеличение критической частоты слоя Es с увеличением скорости ветра в урагане. На ионозонде BC840 зарегистрировано появление слоя Es в день пересечения ураганом Rita береговой линии.

Работа выполнена при поддержке совместного российско-украинского проекта, финансируемого Российским фондом фундаментальных исследований (грант 08-02-90437-Укр) и Национальной академией наук (грант 72-02-а). Авторы выражают благодарность Национальному антарктическому научному центру Украины и University of Massachusetts, Lowell, Center for Atmospheric Research (США) за предоставленные данные вертикального зондирования ионосферы.

### Литература

1. Казимировский Э.Л., Кокоуров В.Д. Движения в ионосфере. Новосибирск: Наука, 1979.
2. Cowling D.H., Webb H.D., Yeh K.C. Group rays of internal gravity waves in a stratified atmosphere // J. Geophys. Res. 1971. V.76. P. 213-220.
3. Hocke K., Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and traveling ionospheric disturbances: 1982-1995 // Ann. Geophysicae. 1996. V.14. P. 917-940.
4. Sorokin V.M., Chmyrev V.M., Yaschenko A.K. Electrodynamic model of the lower atmosphere and the ionosphere coupling // J. Atmos. Terr. Phys. 2001. V.63. P. 1681-1691.
5. Бондур В.Г., Пулинец С.А., Узунов Д. Воздействие крупномасштабных атмосферных вихревых процессов на ионосферу на примере урагана Katrina // Исследование Земли из космоса. 2008. №6. С. 3-11.
6. Huang Y.-N., Cheng K., Chen S.-W. On the detection of acoustic-gravity waves generated by typhoon by use of real time HF Doppler frequency shift sounding system // Radio Sci. 1985. V.20. P.897-906.
7. Xiao Z., Xiao S., Hao Y., Zhang D. Morphological features of ionospheric response to typhoon // J. Geophys. Res. 2007. V.112. A04304, doi:10.1029/2006JA011671.
8. Афраймович Э.Л., Первалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли // Институт солнечно-земной физики. Иркутск: Изд-во ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006.
9. Афраймович Э.Л., Воейков С.В., Ишин А.Б., Первалова Н.П., Ружин Ю.Я. Вариации полного электронного содержания во время мощного тайфуна 5-11 августа 2006 г. у юго-восточного побережья Китая // Геомагнетизм и аэрономия. 2008. Т.48, № 5, С. 1-6.

## **Ionospheric parameters' variations registered during powerful hurricanes near the USA Atlantic coast in 2005**

**A.B. Ishin<sup>1</sup>, S.V. Voeykov<sup>1</sup>, N.P. Perevalova<sup>1</sup>, A.V. Zalizovsky<sup>2</sup>, A.A. Sopin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Institute of Solar-Terrestrial Physics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences  
664033 p/o box 291, Irkutsk, Russia*

<sup>2</sup> *Institute of Radio Astronomy, National Academy of Sciences, 4, Chervonopraporna Str.,  
Kharkiv, 61002, Ukraine  
E-mail: [ishin@iszf.irk.ru](mailto:ishin@iszf.irk.ru)*

The analysis of ionosonde data and total electron content (TEC) variations as deduced from GPS sites data in the region (10°S – 40°N; 260° – 290°E) during September-October 2005 was carried out to find the possible ionospheric effects of the strong hurricanes Rita (18 – 26 September) и Wilma (16-25 October) near south-eastern coast of USA. The intensification of TEC variations in the time period range 2-20 min was found in the region of the hurricane activity.

**Keywords:** hurricanes, GPS, ionosphere, TEC.