

Исследование волновых возмущений ионосферной плазмы по данным дистанционного зондирования во время урагана Katrina

Н.П. Перевалова, А.С. Полякова, А.Б. Ишин, С.В. Войков

*Институт солнечно-земной физики СО РАН, 664033,
Иркутск-33, а/я 291, ИСЗФ СО РАН, тел.: (3952)564580, факс: (3952)511675.
E-mail: pereval@iszf.irk.ru*

По данным фазовых измерений наземных двухчастотных приемников GPS исследована пространственно-временная динамика интенсивности волновых возмущений полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере над зоной действия тропического циклона Katrina (23-31.08.2005). В дни максимальной фазы циклона зарегистрировано усиление интенсивности волновых возмущений ПЭС в двух диапазонах периодов: 02-20 мин и 15-40 мин. Проведено картирование интенсивности возмущений ПЭС в зоне действия циклона. Выполнено сопоставление пространственно-временной динамики возмущений ПЭС с картами приземных метеорологических параметров, полученных по данным архива NCEP/NCAR Reanalysis. Показана перспективность построения и сравнительного анализа карт интенсивности возмущений ПЭС и карт метеопараметров при исследовании реакции ионосферы на тропосферные воздействия.

Ключевые слова: ионосферные возмущения, GPS, тропические циклоны.

Введение

Настоящая работа продолжает серию [1-3] проводимых авторами исследований воздействия тропических циклонов (ТЦ) на ионосферу Земли по данным GPS и вертикального зондирования. В работах [1-2] представлены результаты изучения вариаций полного электронного содержания (ПЭС) и параметров слоя F2 ионосферы (критическая частота $foF2$, высота максимума h_mF2 , высота основания $h'F$) в азиатско-тихоокеанском регионе во время шести ТЦ в сентябре-ноябре 2005 г. Анализ поведения ионосферных параметров (ПЭС, параметры спорадического слоя Es) на атлантическом побережье США в период действия ТЦ Katrina (23-31.08.2005), Rita (18-26.09.2005), Wilma (15-25.10.2005) выполнен в работах [2-3]. В результате проведенных исследований в вариациях ионосферных параметров над зонами действия ТЦ выделены возмущения, с наибольшей вероятностью связанные с циклонической активностью. Возмущения проявлялись в усилении интенсивности колебаний ПЭС с периодами 02-20 мин и 60-90 мин, существенном отклонении $foF2$ и $h'F$ от медианных значений, усилении интенсивности колебаний $foF2$ и $h'F$ с периодами 1.5-6 ч. Показано, что сильнее воздействию ТЦ подвержен спорадический слой Es ионосферы. Полученные авторами результаты согласуются с данными других исследователей, наблюдавших изменение электронной концентрации в ионосфере [4,5], волновые ионосферные возмущения [6,7] и усиление интенсивности колебаний в вариациях ионосферных параметров [8] во время действия ТЦ.

В выполненной авторами серии работ [1-3] показано также, что изучение тропосферных эффектов в ионосфере связано с трудностями детектирования слабых возмущений, выделения их на общем фоне вариаций и с проблемами определения источника таких возмущений. Основными факторами, подавляющими эффекты тропосферных возмущений в ионосфере, являются геомагнитные бури, солнечные вспышки, солнечный терминатор, экваториальная аномалия ионизации. В связи с этим при регистрации откликов ионосферы на ТЦ необходим тщательный учет геофизических условий.

В данной работе для повышения надежности обнаружения и идентификации отклика ионосферы на ТЦ предложено выполнять картирование интенсивности вариаций ПЭС в зоне действия ТЦ и проводить сравнительный анализ пространственно-временной динамики возмущений ПЭС с картами метеорологических параметров. На основе предложенной методики выполнены исследования возмущений ПЭС во время ТЦ Katrina.

Исходные данные и методы анализа

Необычно мощный ураган Katrina признан одной из наиболее разрушительных природных катастроф в истории США. ТЦ Katrina действовал с 23 по 31 августа 2005 г. в северо-западной части Атлантического океана. В ночь на 26 августа циклон достиг фазы урагана (скорость ветра в циклоне Vc превысила 33 м/с), а в период 27-29 августа Katrina находился в максимальной стадии развития (Vc менялась от 50 до 77 м/с). Информация о ТЦ Katrina получена на сайте www.nhc.noaa.gov.

Регистрацию отклика ионосферы на ТЦ Katrina осложняла геофизическая обстановка. Во время действия ТЦ Katrina зарегистрированы две мощные магнитные бури: 24-26.08.2005 (индекс Dst опускался до -216 нТл, индекс Kp=9) и 31.08-05.09.2005 (Dst = -131 нТл, Kp=7). Кроме того, район действия циклона Katrina в дневные часы местного времени попадал в зону больших значений градиента ПЭС на склоне северного гребня экваториальной аномалии ионизации, где высока вероятность генерации неоднородностей ионосферной плазмы. Подробный анализ геофизических условий для ТЦ Katrina показал [2], что поиск ионосферных возмущений, обусловленных воздействием этого циклона, следует проводить: а) в период 27-30 августа, когда геомагнитная обстановка была достаточно спокойной ($Dst \geq -50$, $Kp \leq 3$), а циклон находился в максимальной фазе развития; б) в вечерние илиочные часы местного времени, когда отсутствовала экваториальная аномалия ионизации.

Исследования пространственно-временной динамики волновых возмущений ПЭС проводились по данным фазовых измерений двухчастотных приемников GPS (<http://sopac.ucsd.edu>), расположенных на восточном побережье США вблизи зоны дейст-

вия ТЦ Katrina. Для анализа выбирались временные ряды вариаций ПЭС, полученные в вечерние иочные часы местного времени (в интервале 00:00-10:00 UT). Исходные временные ряды вариаций ПЭС подвергались фильтрации в двух диапазонах периодов: 02-20 мин и 15-40 мин.

Первые, полученные нами, результаты регистрации отклика ионосферы на ТЦ Katrina описаны в статье [2]. В течение трех дней (27-29 августа 2005 г.) в интервале 03:00-07:00 UT (21:00–01:00 LT на долготе -90°E) на пяти станциях GPS (KYW1, MOB1, ENG1, KJUN, MLF1) вблизи траектории ТЦ зарегистрировано значительное усиление колебаний ПЭС в диапазонах периодов 02-20 мин и 15-40 мин. Спокойная геофизическая обстановка, время появления и характер поведения возмущений ПЭС дали основания считать, что эти возмущения обусловлены воздействием на ионосферу ТЦ Katrina. С целью проверки данного предположения и в продолжение начатой в [2] работы было увеличено количество станций GPS, данные которых подвергались обработке, а также применена новая методика визуализации данных.

Для определения пространственной локализации наблюдаемых возмущений предложен метод картирования интенсивности возмущений ПЭС. Суть данного метода заключается в том, что на карту наносятся траектории ионосферных точек (ИТ) лучей "приемник-спутник GPS". При этом положение каждой ИТ отображается кругом, радиус которого пропорционален абсолютному значению отфильтрованного ПЭС $|dI(t)|$, зарегистрированному на данном луче в данный момент времени. Полученные карты интенсивности возмущений ПЭС позволяют определить, где (в горизонтальной плоскости) располагаются неоднородности ионосферной плазмы, которые проявляются во временных вариациях ПЭС в виде колебаний с выбранными периодами.

Построенные пространственные распределения интенсивности возмущений ПЭС дают возможность также провести их сопоставление с картами метеорологических параметров. В настоящей работе возмущения ПЭС во время ТЦ Katrina сравнивались с поведением приземных метеорологических параметров (давление, зональная и меридиональная скорость ветра). Для построения карт метеопараметров мы использовали 6-часовые данные архива NCEP/NCAR Reanalysis (<http://www.esrl.noaa.gov/psd>). Архив предоставляет среднесуточные и 6-часовые значения метеорологических параметров на географической сетке координат с шагом 2.5° по широте и долготе. В силу пространственно-временного усреднения, применяемого в NCEP/NCAR Reanalysis, данные архива на масштабах, меньших, чем шаг сетки, могут быть использованы для качественной оценки картины метеорологической обстановки в регионе. Для количественных оценок использовались данные прямых метеонаблюдений www.nhc.noaa.gov.

Динамика возмущений ПЭС и приземного давления

На рис. 1 приведены примеры возмущений во временных вариациях ПЭС, отфильтрованных в диапазонах периодов 02-20 мин и 15-40 мин, которые были получены 28 августа на станциях KYW1 (близкой к траектории ТЦ Katrina) и AMC2 (удаленной от траектории ТЦ Katrina). Пространственные распределения интенсивности зарегистрированных возмущений ПЭС, построенные по описанному выше методу, приведены на рис. 2-4.

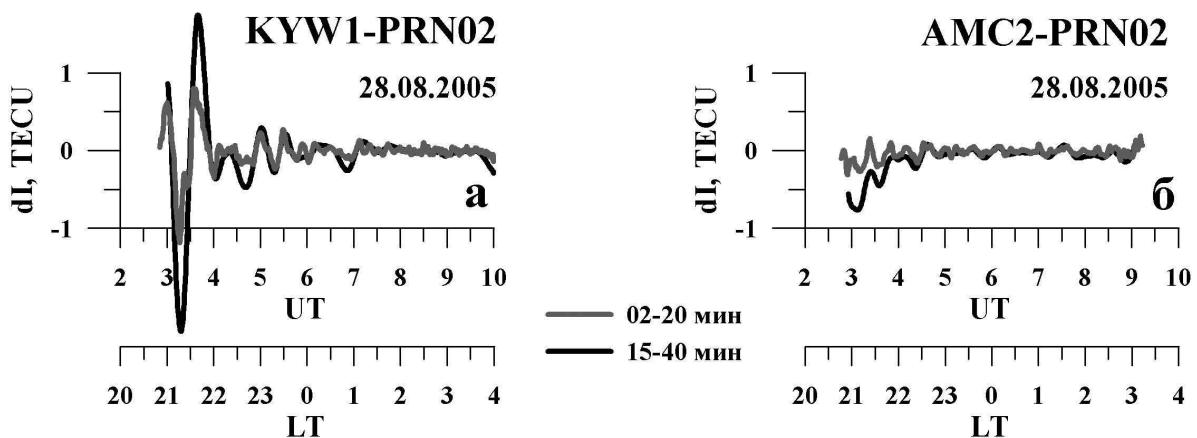


Рис. 1. Вариации ПЭС, отфильтрованные в диапазонах периодов 02-20 мин и 15-40 мин, полученные 28 августа 2005 г. на станциях KYW1 (а) и AMC2 (б) для спутника GPS PRN02. Нанесены шкалы местного времени LT для долготы -90°E

Рис. 2 демонстрирует пространственно-временную динамику колебаний ПЭС с периодами 02-20 мин и вариации приземного давления с 24 по 31 августа 2005 г. Черными линиями переменной толщины на рис. 2 нанесены траектории ионосферных точек для спутников PRN02, PRN04, PRN07, наблюдавшихся в вечернее/ночное время 24-31.08.2005 на 10 станциях GPS. В левом нижнем углу каждой панели в качестве масштаба показан круг, соответствующий $|dI(t)|=2.0$ TECU ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ m}^{-2}$). На всех станциях 24 августа (рис. 2а) регистрировались небольшие возмущения ПЭС, связанные, очевидно, с магнитной бурей. Отметим, что интенсивность возмущений ПЭС в этот день для всех станций была примерно одинаковой. Наиболее спокойным днем в вариациях ПЭС являлось 25 августа (рис. 2б): магнитная буря в этот день подходила к концу, а ТЦ Katrina еще не набрал мощи. С 27 августа (рис. 2г), когда давление в ТЦ Katrina упало до 950 гПа, а скорость ветра V_c превысила 50 м/с (www.nhc.noaa.gov), над зоной действия циклона начало наблюдаться заметное усиление интенсивности колебаний ПЭС. 28-29 августа (рис. 2д-е) давление в циклоне опускалось до минимальных значений около 910 гПа, V_c достигала 70 м/с (www.nhc.noaa.gov). В эти дни регистрировались максимальные возмущения ПЭС с амплитудой, превышающей уровень флуктуаций в спокойных условиях более чем в 2.5 раза. В отличие от 24 августа, интенсивность колебаний ПЭС была выше на лучах "приемник-спутник", которые проходили ближе к урагану.

гану. Так, например, 28 августа максимальная амплитуда колебаний регистрировалась на наиболее близких к центру ТЦ Katrina станциях KYW1 и MIA3. 29 августа, когда ураган сместился к северу, интенсивность возмущений ПЭС на станциях KYW1 и MIA3 упала, а на более северных станциях MLF1, KJUN, ARP3 - заметно возросла. На лучах, удаленных от зоны действия циклона (станции AMC2, WIL1), возмущений ПЭС, практически, не регистрировалось. Радиус области, где наблюдались возмущения ПЭС с временными масштабами 02-20 мин, составляет около 2000 км от центра циклона в период его максимального развития. Интересно отметить, что большинство возмущений ПЭС регистрировалось над зоной действия циклона и к юго-западу от нее. Интенсивность возмущений ПЭС на всех станциях резко упала 30 августа (рис. 2ж), когда давление в циклоне поднялось до 960 гПа, а скорость ветра стала меньше 25 м/с (www.nhc.noaa.gov).

Динамика возмущений ПЭС и вариации скорости ветра

На рис. 3, 4 представлены пространственные распределения интенсивности возмущений ПЭС двух диапазонов периодов (02-20 мин и 15-40 мин) в сравнении с картами скоростей меридионального (V) и зонального (U) ветров. Приведены карты для двух наиболее возмущенных (28, 29 августа) и двух наиболее спокойных (25, 30 августа) дней. Вращательный характер движения воздушных масс в области циклона отражают два максимума скорости (положительный и отрицательный) на картах V и U. Для меридионального ветра максимумы располагаются к западу и к востоку от центра циклона, для зонального ветра – к северу и к югу.

Как и следовало ожидать, интенсивность более длиннопериодных (15-40 мин) колебаний ПЭС, в целом, оказалась выше, особенно, на фазе восстановления магнитной бури 25 августа. Пространственно-временная динамика колебаний с периодами 15-40 мин повторяла в общих чертах динамику короткопериодных (02-20 мин) колебаний, описанную в предыдущем разделе: с ростом активности циклона увеличивалась интенсивность возмущений ПЭС, наибольшая интенсивность наблюдалась 28-29 августа в максимуме развития урагана, с уменьшением активности циклона уменьшалась и интенсивность возмущений ПЭС. В отличие от колебаний 02-20 мин, заметное увеличение интенсивности длиннопериодных возмущений ПЭС регистрировалось и на лучах, удаленных от траектории циклона (станции AMC2, WIL1). Это означает, что зона с крупномасштабными возмущениями ПЭС охватывала большую территорию. Можно отметить, что области, где регистрировалось усиление возмущений ПЭС, как правило, совпадали с областями повышенных (по модулю) значений меридиональной скорости ветра.

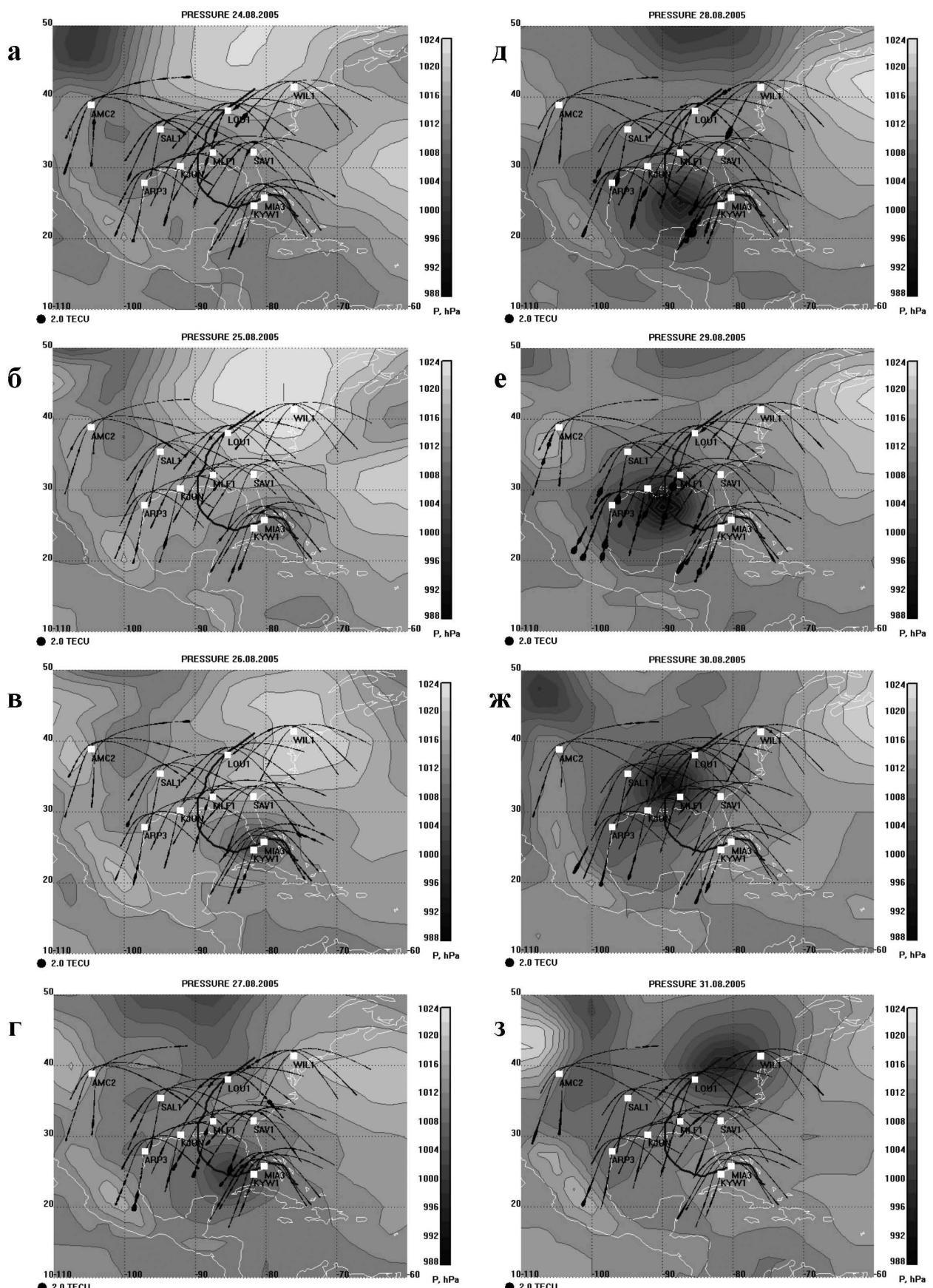


Рис. 2. Пространственное распределение интенсивности колебаний ПЭС с периодами 02-20 мин (черные линии переменной толщины) в зоне действия ТЦ Katrina 24-30 августа 2005 г. Заливкой показано распределение приземного давления Р по данным NCEP/NCAR Reanalysis. Толстая черная линия отображает траекторию движения ТЦ Katrina по данным www.nhc.noaa.gov. Квадратами отмечено положение станций GPS

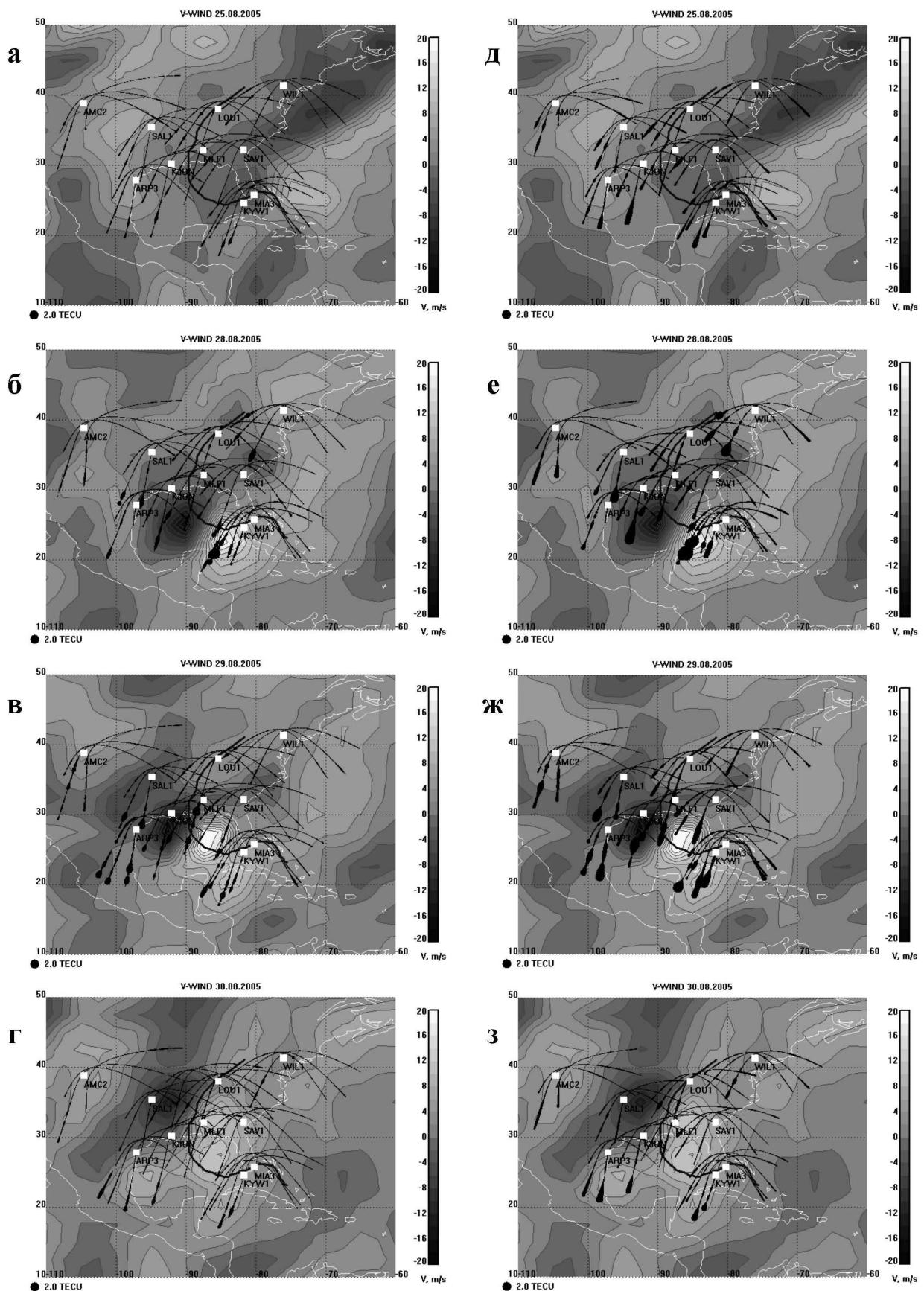


Рис. 3. Пространственное распределение интенсивности колебаний ПЭС (черные линии переменной толщины) с периодами 02-20 мин (слева), 15-40 мин (справа) в относительно спокойные дни 25, 30 августа (а, г, д, з) и на максимальной стадии ТЦ Katrina 28, 29 августа (б, в, е, ж). Заливкой показано распределение скорости меридионального ветра по данным NCEP/NCAR Reanalysis (положительный меридиональный ветер направлен на север). Толстая черная линия отображает траекторию движения ТЦ Katrina по данным www.nhc.noaa.gov. Квадратами отмечено положение станций GPS

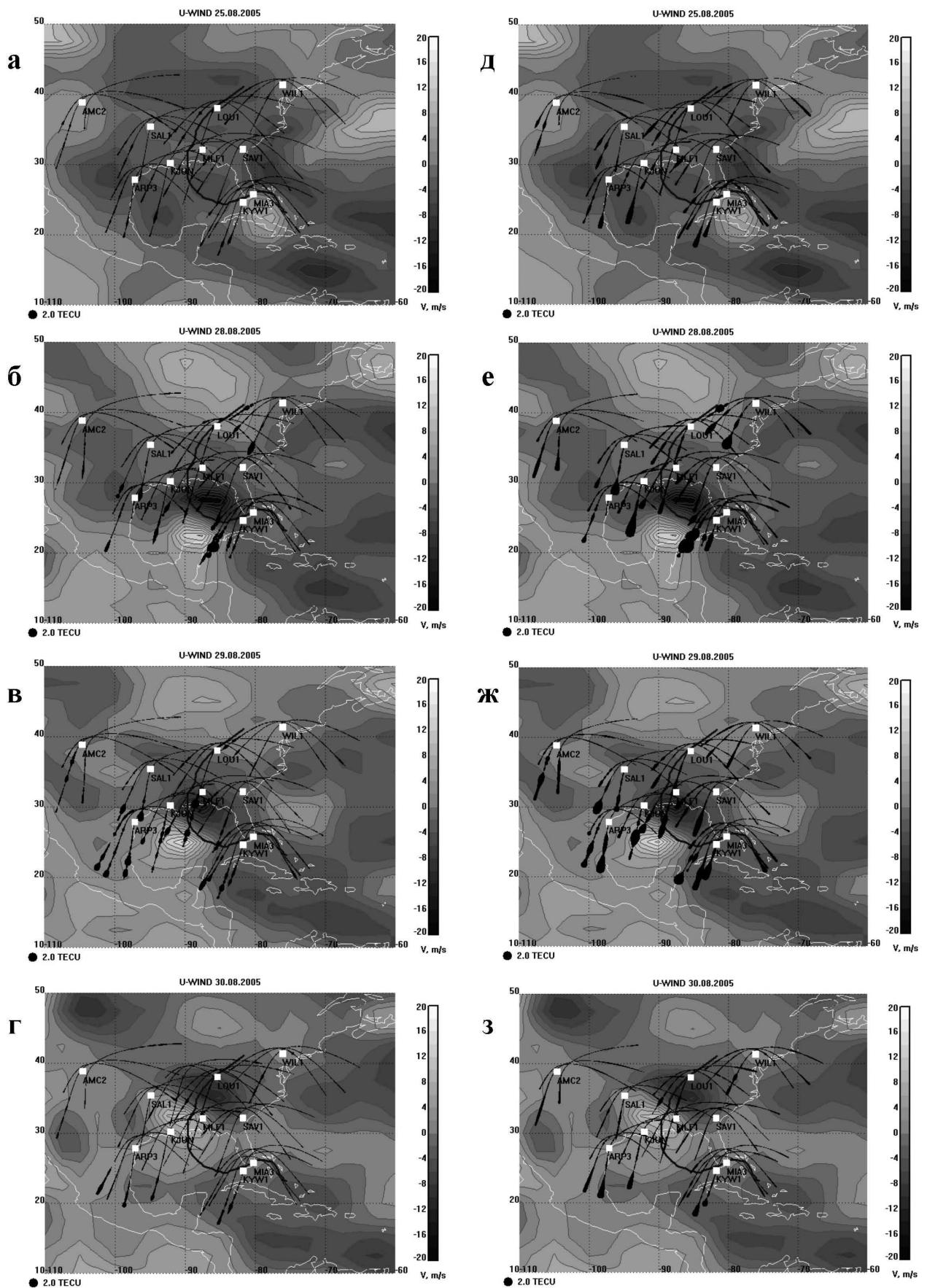


Рис. 4. То же, что на рис. 3, но заливкой показано распределение скорости зонального ветра по данным NCEP/NCAR Reanalysis (положительный зональный ветер направлен на восток)

Обсуждение и заключение

На расширенном экспериментальном материале подтверждены полученные в [2] предварительные результаты регистрации отклика ионосферы на ТЦ Katrina. Во время действия ТЦ Katrina выявлено усиление колебаний ПЭС в диапазонах периодов 02-20 мин и 15-40 мин. Усиления наблюдались в спокойных геофизических условиях, поэтому увеличение амплитуды вариаций ПЭС не связаны с эффектами магнитных бурь и экваториальной аномалии ионизации. Сравнительный анализ динамики пространственного распределения возмущений ПЭС с картами метеорологических параметров позволил с высокой степенью уверенности заключить, что обнаруженное усиление колебаний ПЭС обусловлено воздействием ТЦ Katrina. Пространственное распределение и характер поведения возмущений ПЭС, зарегистрированных во время ТЦ Katrina, свидетельствуют о том, что над траекторией циклона на высотах ионосферы существовала область неоднородностей ионосферной плазмы. Область сформировалась, когда ТЦ достиг стадии урагана, и перемещалась вслед за движением циклона. В период максимально развития ТЦ Katrina возмущения ПЭС с малыми периодами (02-20 мин) наблюдались на расстояниях не более 2000 км от центра циклона. Колебания с периодами 15-40 мин регистрировались на больших расстояниях. Это подтверждает теоретические расчеты [9], показавшие, что над местом локального возмущения атмосферы в силу быстрого затухания из-за вязкости и теплопроводности должны наблюдаться акустико-гравитационные волны (АГВ) с периодами в несколько минут. На больших горизонтальных расстояниях от локального источника в атмосфере будут регистрироваться внутренние гравитационные волны (ВГВ) с периодами от десятков минут до 2–3 ч. Представленные в настоящей статье результаты согласуются с результатами ранних работ авторов [1-3] и данными других исследователей [5-8].

Проведенные исследования показали перспективность построения и сравнительного анализа карт интенсивности возмущений ПЭС и карт метеорологических параметров при исследовании реакции ионосферы на тропосферные воздействия. Совместный анализ карт возмущений ПЭС и метеопараметров обеспечивает возможность идентификации ионосферных возмущений, обусловленных воздействием ТЦ.

Благодарности. Авторы выражают благодарность сотрудникам Scripps Orbit and Permanent Array Center (SOPAC) за предоставленные ими данные GPS, а также центру изучения атмосферы National Centers for Environmental Prediction (NCEP) за метеоданные архива NCEP/NCAR Reanalysis. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 08-05-00658).

Литература

1. Perevalova N.P., Polekh N.M. An investigation of the upper atmosphere response to cyclones using ionosonde data in Eastern Siberia and the Far East // Proceedings of SPIE, 2009. V.7296 p. 72960J1-72960J11.
2. Перевалова Н.П., Ишин А.Б. Эффекты тропических циклонов в ионосфере по данным зондирования сигналами спутниковой радионавигационной системы GPS // Исследование Земли из космоса, 2010. N 2 (в печати).
3. Ишин А.Б., Войков С.В., Перевалова Н.П., Зализовский А.В., Сопин А.А. Вариации ионосферных параметров, наблюдавшиеся во время мощных ураганов 2005 г. вблизи атлантического побережья США // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. М.: ООО "Азбука-2000", 2009. Вып. 6, Т. 2. с. 274-279.
4. Ванина-Дарт Л.Б., Покровская И.В., Шарков Е.А. Исследование взаимодействия нижней экваториальной ионосферы с топическими циклонами по данным дистанционного и ракетного зондирования // Исследование Земли из космоса, 2007. N1. С.1-9.
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. Черниговская М.А., Шарков Е.А., Куркин В.И., Орлов И.И., Покровская И.В. Коротко-периодные временные вариации ионосферных параметров в регионе Сибири и Дальнего Востока // Исследование Земли из космоса, 2008. № 6. С. 17-24.
9. Куницын В.Е., Сураев С.Н., Ахмедов Р.Р. Моделирование распространения акустико-гравитационных волн в атмосфере для различных поверхностных источников // Вестн. МГУ. Сер. 3. Физика, астрономия, 2007. № 2. С. 59-63.

Study of wave disturbances of ionospheric plasma during tropical cyclone Katrina using remote sounding data

N.P. Perevalova, A.S. Polyakova, A.B. Ishin, S.V. Voeykov

*Institute of Solar-Terrestrial Physics, Russian Academy of Sciences SB RAS,
664043, Russia, Irkutsk, p/b 291, ph.: (3952) 564580, fax: (3952)511675
E-mail: pereval@iszf.irk.ru*

Spatial-temporal dynamics of Total Electron Content (TEC) disturbances during tropical cyclone Katrina (23-31.08.2005) was examined. The TEC data from the international network of two-frequency ground-based GPS receivers were used. An increase in intensity of TEC oscillations with periods of 02-20 min and 15-40 min was registered during the maximum cyclone phase. We mapped the TEC disturbance intensity within the cyclone coverage and made comparative analysis of spatial-temporal dynamics of TEC disturbances and maps of near-surface meteorological parameters. For this purpose, the NSEP/NCAR Reanalysis meteorological data were used. We also showed efficiency of construction and comparative analysis of TEC disturbance intensity maps and meteorological maps for studying tropospheric effects on the ionosphere.

Keywords: ionospheric disturbances, tropical cyclones, GPS.