

# Исследование ионосферы в районе прохождения тропических циклонов, на примере ТЦ «Катрина», по данным спутниковых навигационных систем

Е.С. Митюшина

*Научный центр аэрокосмического мониторинга «АЭРОКОСМОС»*

*105064 Москва, Гороховский пер., 4*

*E-mail: [elenamityushina@gmail.com](mailto:elenamityushina@gmail.com)*

В данной работе рассмотрены характеристики ионосферы в районе прохождения тропического циклона «Катрина» 24-28 сентября 2005 года. Параметры ионосферы определялись методом радиопросвечивания ионосферы на наклонных трассах с использованием спутниковой радионавигационной системы GPS (Navstar). С использованием данного метода построены: временная изменчивость электронной концентрации над ТЦ «Катрина» в момент его наибольшей интенсивности, карты распределения электронной концентрации и трехмерные пространственные представления ионосферы в районе прохождения ТЦ «Катрина». Обнаружено изменение пространственно-временного хода в распределении электронной концентрации над ТЦ «Катрина» 28 августа 2005 г.

**Ключевые слова:** тропический циклон, ионосфера, метод радиопросвечивания, GPS.

## Введение

Важной особенностью наблюдений Земли из космоса является возможность контроля больших территорий, что можно с успехом использовать для исследования динамических процессов в атмосфере, в том числе таких, как тропические циклоны, циклоны умеренных широт, внетропические ураганы и др. Одним из наиболее актуальных направлений таких исследований является изучение и мониторинг тропических циклонов (ТЦ). Это связано с тем, что ТЦ являются самыми разрушительными из всех видов природных катастроф. Их влиянию подвержены территории более 50 стран, в которых проживает более половины человечества. Наибольший ущерб приносят ураганные ветры в области ТЦ, сопровождающиеся штормовыми нагонами воды и наводнениями. Материальный ущерб от воздействия ТЦ превышает 7 млрд. долларов в год. Кроме того, эти катастрофические явления уносят множество человеческих жизней. Поэтому чрезвычайно важно детальное изучение ТЦ с целью выделить характерные отличительные признаки для прогноза их эволюции и направления движения [1].

В последнее время все больше внимания уделяется комплексным проблемам, лежащим на стыках различных областей знаний. Примером может служить изучение мезомасштабных атмосферных вихрей (ТЦ). Для изучения их природы используют данные дистанционного зондирования Земли (съемку в видимом, микроволновом и ИК-диапазонах, радиолокационную съемку и др.) в сочетании с контактными методами.

Одним из новых и перспективных подходов к изучению тайфунов является выявление ионосферных эффектов и их интерпретация.

## Взаимосвязь ионосферы и тропических циклонов

Ионосфера по своей природе, вследствие статистической неоднородности, имеет сильные пространственно-временные изменения. Поэтому ее электронная концентрация в любой точке

может быть задана через ее среднее значение  $N_e$  и флуктуацию  $\delta$  величины  $N_e$ . Флуктуация  $\delta N_e$ , как правило, малы по сравнению со средними значениями  $N_e$ . Однако наряду с этими флуктуациями параметров ионосферы наблюдаются регулярные и нерегулярные изменения самих средних значений этих параметров. Эти вариации могут быть соизмеримы со средними значениями электронной концентрации. В любом случае, эти вариации соизмеримы со средними значениями электронной концентрации в данной точке. Отклонения параметров ионосферы от их спокойного суточного хода, имеющие характерные временные масштабы от десятков минут до нескольких суток, проявляются на расстояниях в сотни и тысячи километров. [2]

В связи с тем, что свойства ионосферы подвержены и нерегулярным вариациям, поиски ионосферных эффектов от ТЦ долгое время не привлекали достаточного внимания и не были направлением исследований. Исследования последних лет [3-7] показали, что ионосфера чувствительна ко многим процессам, происходящим на Земле. Излучения Солнца и вулканическая деятельность, цунами и землетрясения, грозы и циклоны, запуск спутников и ракет, преодоление летательными аппаратами звукового барьера и мощные взрывы – все это находит отклик в ионосфере [5].

Наземные методы измерений, как правило, не позволяют проводить длительные и непрерывные наблюдения [3], а также наблюдения над поверхностью Мирового океана.

Применение же глобальных радионавигационных спутниковых систем GPS совместно с методами решения обратных задач позволяют проводить регулярные и длительные измерения на значительном удалении от станций приема и не требует значительных финансовых затрат. Это дает возможность изучать временные и пространственные закономерности, происходящие в ионосфере не только над землей, но и над поверхностью океана. Получаемые в результате инверсии навигационных измерений высотные профили могут служить основой для построения карт и трехмерных пространственных распределений электронной концентрации ионосферы.

Анализ потенциальных возможностей GPS-мониторинга ионосферы в районе прохождения тропических циклонов рассмотрен на примере тропического циклона 5 категории «Катрина» 23-31 августа 2005 г.

### Геометрия зоны проведения исследования

ТЦ «Катрина» возник 23 августа 2005 г. в атлантической зоне тропического циклогенеза. Максимальной интенсивности (5 категория, максимальная скорость ветра – 175 миль в час, минимальное давление – 902 мбар) тайфун достиг 28 августа 2005 г. В таблице 1 представлены траекторные особенности и некоторые другие его характеристики по данным спутника GOES-11 и электронной базы данных «Глобал-ТЦ» [8].

Таблица 1. Траекторные особенности ТЦ «Катрина»

Время (UTC)	Дата	Широта	Долгота	Ветер (миль/час)	Давление (мбар)	Стадия
18	23.08.05	23.1° с.ш.	75.1° з.д.	35	1008	Тропическая депрессия
0	24.08.05	23.4° с.ш.	75.7° з.д.	35	1007	Тропическая депрессия
6	24.08.05	23.8° с.ш.	76.2° з.д.	35	1007	Тропическая депрессия
12	24.08.05	24.5° с.ш.	76.5° з.д.	40	1006	Тропический шторм
18	24.08.05	25.4° с.ш.	76.9° з.д.	45	1003	Тропический шторм
0	25.08.05	26.0° с.ш.	77.7° з.д.	50	1000	Тропический шторм
6	25.08.05	26.1° с.ш.	78.4° з.д.	60	997	Тропический шторм
12	25.08.05	26.2° с.ш.	79.0° з.д.	65	994	Тропический шторм
18	25.08.05	26.2° с.ш.	79.6° з.д.	70	988	Тропический шторм
0	26.08.05	25.9° с.ш.	80.3° з.д.	80	983	1 категория
6	26.08.05	25.4° с.ш.	81.3° з.д.	75	987	1 категория
12	26.08.05	25.1° с.ш.	82.0° з.д.	85	979	1 категория
18	26.08.05	24.9° с.ш.	82.6° з.д.	100	968	2 категория

0	27.08.05	24.6° с.ш.	83.3° з.д.	105	959	2 категория
6	27.08.05	24.4° с.ш.	84.0° з.д.	110	950	2 категория
12	27.08.05	24.4° с.ш.	84.7° з.д.	115	942	3 категория
18	27.08.05	24.5° с.ш.	85.3° з.д.	115	948	3 категория
0	28.08.05	24.8° с.ш.	85.9° з.д.	115	941	3 категория
6	28.08.05	25.2° с.ш.	86.7° з.д.	145	930	4 категория
12	28.08.05	25.7° с.ш.	87.7° з.д.	165	909	5 категория
18	28.08.05	26.3° с.ш.	88.6° з.д.	175	902	5 категория
0	29.08.05	27.2° с.ш.	89.2° з.д.	160	905	5 категория
6	29.08.05	28.2° с.ш.	89.6° з.д.	145	913	4 категория
12	29.08.05	29.5° с.ш.	89.6° з.д.	125	923	3 категория
18	29.08.05	31.1° с.ш.	89.6° з.д.	90	948	1 категория
0	30.08.05	32.6° с.ш.	89.1° з.д.	60	961	Тропический шторм
6	30.08.05	34.1° с.ш.	88.6° з.д.	45	978	Тропический шторм
12	30.08.05	35.6° с.ш.	88.0° з.д.	35	985	Тропическая депрессия
18	30.08.05	37.0° с.ш.	87.0° з.д.	35	990	Тропическая депрессия
0	31.08.05	38.6° с.ш.	85.3° з.д.	35	994	Внетропический шторм
6	31.08.05	40.1° с.ш.	82.9° з.д.	30	996	Внетропический шторм

Как показано в работе [9], для локализации области ионосферного возмущения необходимо проводить мониторинг с разрешением по поверхности Земли не хуже  $2^{\circ} \cdot 2^{\circ}$  (примерно 200 на 200 км).

Для определения параметров ионосферы использовались данные с 4-х наземных станций международной геофизической сети (IGS): ENG1 (29.879° с.ш.; 89.9417° з.д.), KYW1 (24.5823° с.ш.; 81.653° з.д.), MCD1 (27.84982° с.ш.; 82.53232° з.д.) и MSSC (30.37581° с.ш.; 89.61361° з.д.). Их расположение, а также траектория тайфуна показаны на рисунке 1.

Такое взаимное расположение станций позволяет обеспечить разрешение, необходимое для выявления ионосферных неоднородностей.

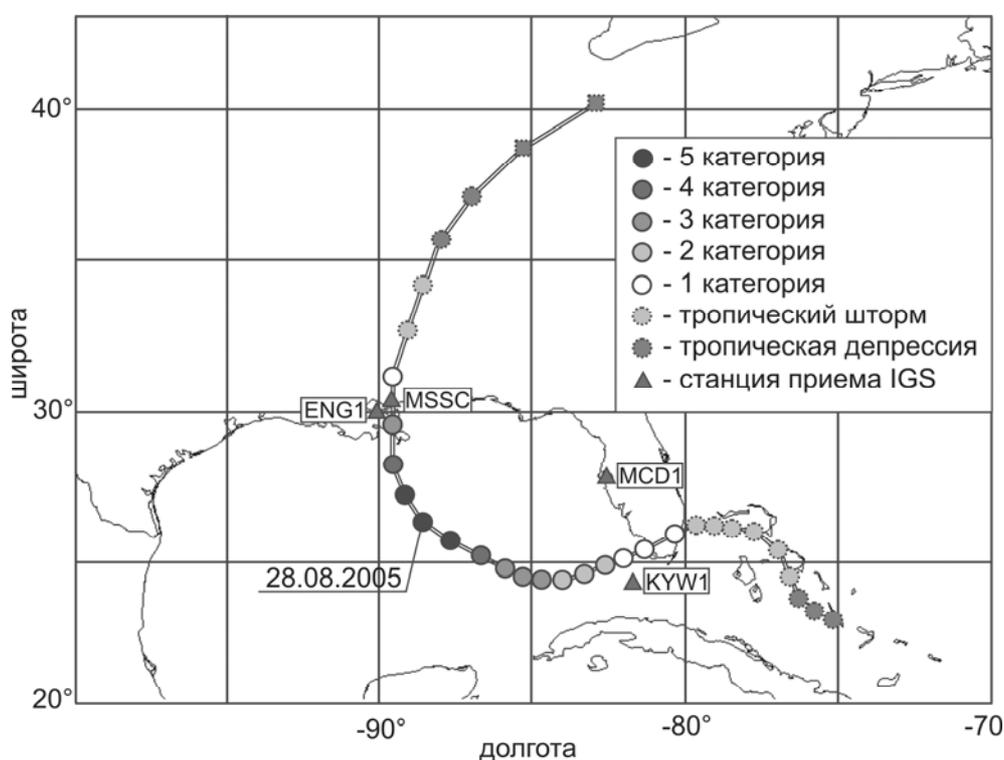


Рис. 1. Геометрия зоны проведения исследования

## Ионосферные вариации в период прохождения ТЦ «Катрина»

Для определения параметров ионосферы использовался метод радиопросвечивания и его алгоритмическая реализация, которые были предложены в работе [4]. Они позволяют восстанавливать высотные профили электронной концентрации ионосферы на основании двухчастотных радиосигналов, регистрируемых приемниками спутниковых навигационных систем. При этом используются измерения параметров радиосигналов на трассе «спутник – наземный пункт» по данным с одного пункта.

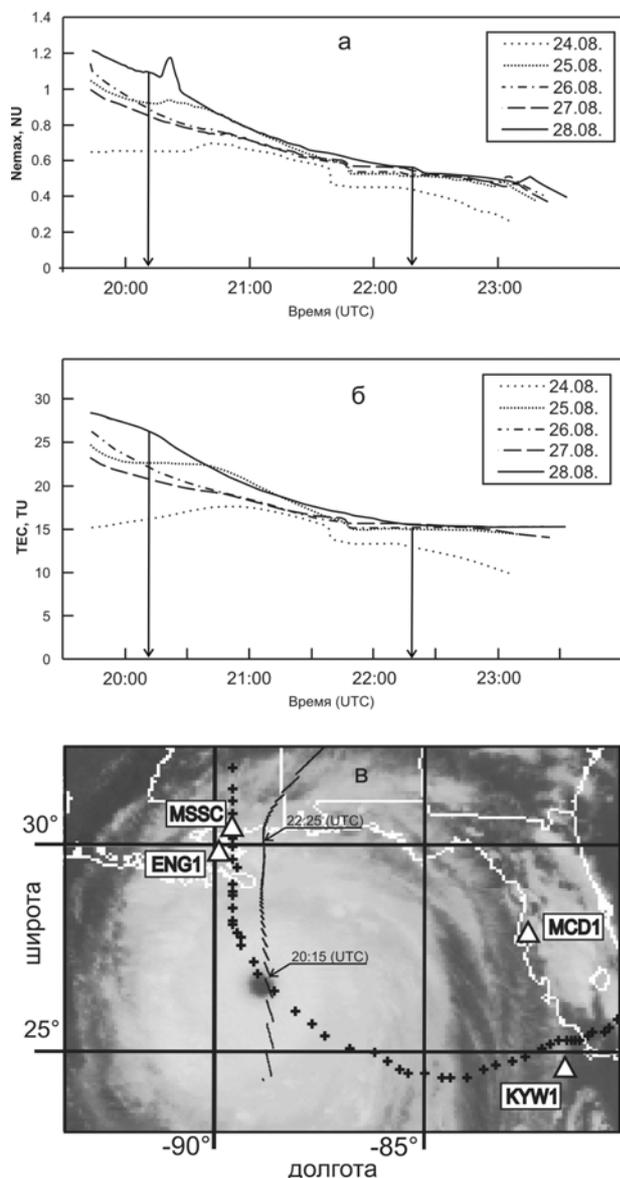


Рис. 2. Временные вариации  $N_{max}$  (а) и TEC (б) 24 – 28 августа 2005 г. (станция приема ENG1, спутник №19), положение ТЦ «Катрина» 20:15 (UTC) 28 августа 2005 г. (в)

построены временные вариации TEC и  $N_{max}$  на период 24-28 августа 2005 года.

Результаты построения представлены на (рис. 2).

На рисунке 2 показана временная изменчивость электронной концентрации в максимуме слоя F2 (а) и полной электронной концентрации (б) 24 – 28 августа 2005 г. Также здесь отображено

Применение метода радиопросвечивания ионосферы на наклонных трассах позволяет определить следующие параметры ионосферы вдоль траектории спутника с дискретностью до 30-ти секунд для каждой подионосферной точки:

1. Полную электронную концентрацию ионосферы TEC, TU ( $1TU = 10^{16} \text{ эл} / \text{м}^2$ );
2. Электронную концентрацию в максимуме слоя F2  $N_{max}$ , NU ( $1NU = 10^6 \text{ эл} / \text{см}^3$ ) и высоту этого максимума;
3. Электронную концентрацию на высоте 100 км;
4. Вертикальные профили электронной концентрации на высотах от 65 до 1050 км с дискретностью 50 км.

Исходные данные для определения этих параметров были получены с ftp-сервера <ftp://lox.ucsd.edu/> и прошли предварительную обработку.

Для определения параметров ионосферы непосредственно над тропическим циклоном «Катрина» в момент его наибольшей интенсивности использовались данные об электронной концентрации вдоль траектории спутника №19, наблюдаемого со станции ENG1 24-28 августа 2005 г. Для этого были:

- построены траектории подионосферных точек для всех спутников, наблюдаемых со станций ENG1, KYW1, MCD1 и MSSC за сутки;
- выбраны траектории подионосферных точек для спутников, проходящие над центром тропического циклона с учетом его интенсивности;
- для данных траекторий рассчитаны и

расположение ТЦ «Катрина» в 20:15, траектория подионосферных точек для спутника №19 (рис. 2в), наблюдаемого со станции ENG1, крестами показана траектория ТЦ «Катрина». Стрелками показано положение спутника в конкретный момент времени. На рисунке хорошо видно, что в момент пролета спутника над ТЦ пространственно-временной ход в распределении электронной концентрации отличается от предыдущих дней, когда циклон был на значительном удалении и имел меньшую интенсивность. Над центром ТЦ обнаружено резкое повышение электронной концентрации в максимуме слоя F2.

В данной работе также проводилось построение пространственных представлений электронной концентрации ионосферы с использованием значений TEC, N<sub>max</sub> и вертикальных профилей. Для этого были выполнены следующие действия:

- выбран временной интервал 20:00 – 20:30 (UTC), за который электронная концентрация изменялась с наименьшим градиентом, и наблюдалось максимальное количество спутников;
- для наблюдаемых спутников рассчитаны параметры ионосферы;
- проведено усреднение значений электронной концентрации за выбранный временной интервал;
- сформирован массив данных для построения трехмерных пространственных представлений и карт электронной концентрации;
- по данным TEC и N<sub>max</sub> были построены карты полной электронной концентрации и концентрации электронов в максимуме слоя F2 на 20:00 – 20:30 (UTC) для 27 и 28 августа 2005 г. (период максимальной активности ТЦ «Катрина»);
- вертикальные профили электронной концентрации позволили построить трехмерные пространственные представления ионосферы на высотах 65 – 1050 км на 20:00 – 20:30 (UTC) для 27 и 28 августа 2005 г.

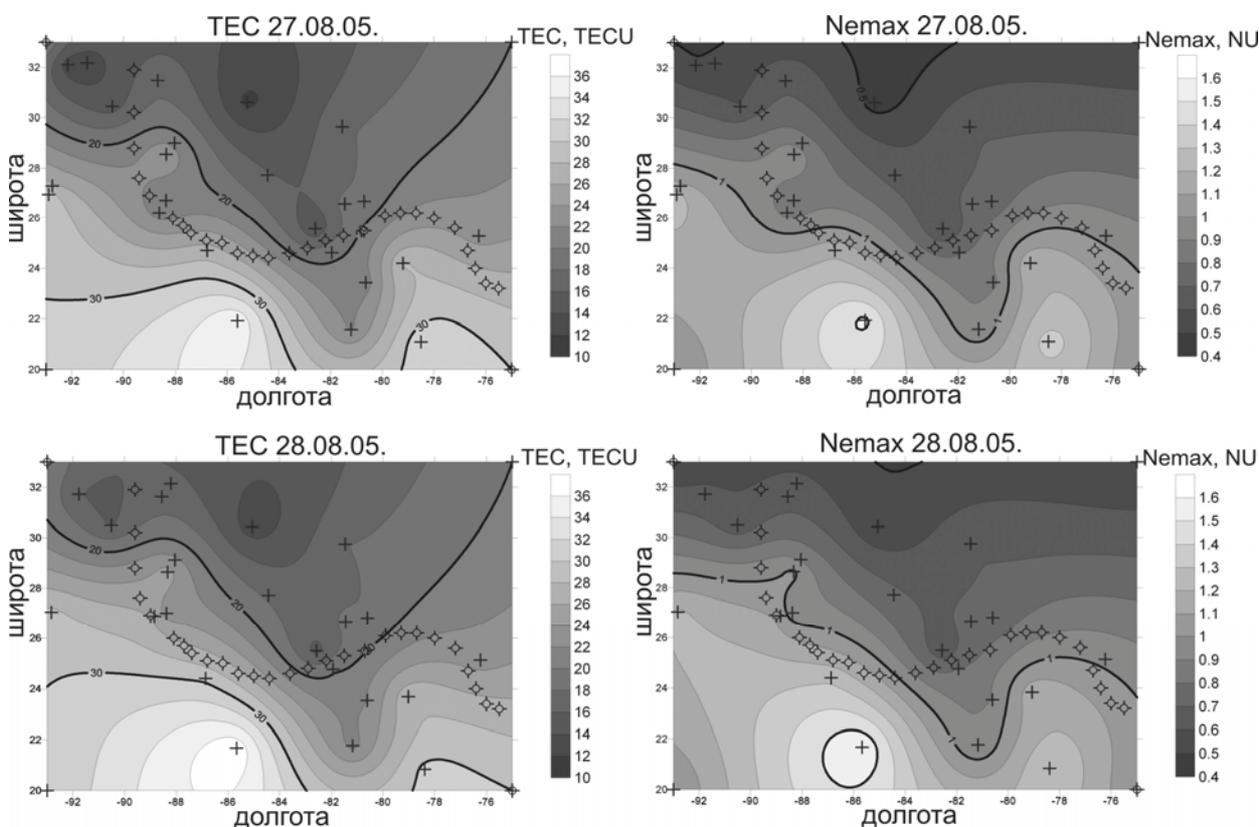


Рис. 3. Карты TEC и N<sub>max</sub> 27 и 28 августа 2005 г.

Результаты построения карт TЕС и Nemaх представлены на рис. 3.

На рисунке изолинии отображают изменения электронной концентрации (TЕС или Nemaх); крестами показано положение точек, для которых производилось определение параметров ионосферы; кружки показывают траекторию ТЦ «Катрина» по данным спутника GOES-11.

Трехмерные пространственные представления не удобны для визуального восприятия и отображения, но они позволяют строить разрезы ионосферы по различным плоскостям, а также трехмерные представления электронной концентрации в максимуме слоя F2 (рис. 4).

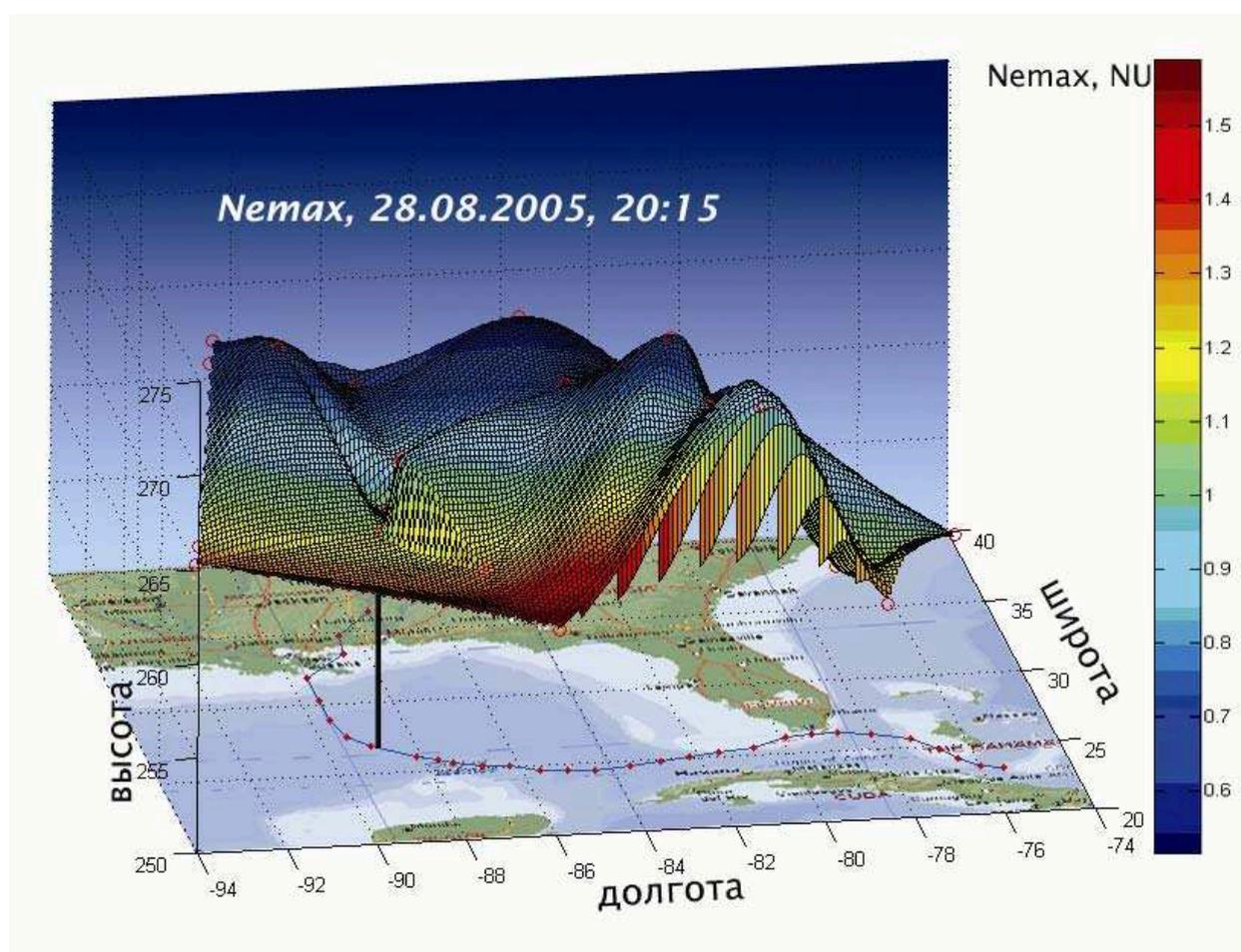


Рис. 4. Распределение электронной концентрации в максимуме слоя F2 в 20:15 (UTC) 28 августа 2005

Карты и трехмерные пространственные представления хорошо отображают состояние и изменение электронной концентрации TЕС и Nemaх на всей территории прохождения ТЦ «Катрина», они могут использоваться для проведения комплексного анализа ТЦ с целью выявления характерных особенностей их зарождения и эволюции.

### Выводы

Метод радиопросвечивания ионосферы на наклонных трассах с использованием спутниковой радионавигационной системы GPS позволил определить параметры ионосферы непосредственно над тропическим циклоном «Катрина». Было выявлено изменение пространственно-временного хода в распределении электронной концентрации.

Построение пространственных представлений ионосферы в районе прохождения ТЦ позволяет учитывать флуктуации ионосферных параметров при комплексном изучении тропических циклонов с использованием снимков, карт распределения водяного пара над поверхностью Земли и др.; а также при проведении мониторинга в районах активного циклогенеза.

## Литература

1. Бондур В.Г., Калери А.Ю., Лазарев А.И. Наблюдения Земли из космоса. Орбитальная станция «Мир». Март-август 1992 г. СПб: Гидрометеоздат, 1997.
2. Смирнов В.М. Вариации ионосферы в период землетрясений по данным навигационных систем // Электронный журнал «Исследовано в России», 2001. №153. С. 1759-1767.
3. Смирнов В.М., Смирнова Е.В. Детектирование сейсмоионосферных вариаций в период геомагнитных возмущений по данным навигационных систем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных объектов и явлений. Сб. научн. статей. М.: ООО «Азбука-2000», 2006. Т. II. С.242-246.
4. Бондур В.Г., Смирнов В.М. Метод мониторинга сейсмоопасных территорий по ионосферным вариациям, регистрируемым спутниковыми навигационными системами // Доклады Академии наук, 2005. Т. 402. №5. С.675-679.
5. Пулинец С.А., Хегай В.В., Боярчук К.А., Ломоносов А.М. Атмосферное электрическое поле как источник изменчивости ионосферы // Успехи физических наук, 1998. Т.41. № 5.С.515-522.
6. Бондур В.Г., Пулинец С.А., Ким Г.А. О роли вариаций галактических космических лучей в тропическом циклогенезе на примере урагана Катрина // Доклады Академии наук, 2008. Т.422. № 2. С.244-249.
7. Бондур В.Г., Пулинец С.А., Урзунов Д. Воздействие крупномасштабных атмосферных вихревых процессов на ионосферу на примере урагана Katrina // Исследование Земли из космоса, 2008. №6. С.3-11.
8. Электронная база данных «Глобал-ТЦ», ИКИ РАН.
9. Смирнов В.М. Метод мониторинга ионосферы Земли на основе использования навигационных спутниковых систем // Автореферат, 2007.

## **Ionosphere study in the areas of tropical cyclone propagation using satellite navigation system data by Katrina hurricane example**

**E.S. Mitushina**

*Scientific Center for Aerospace Monitoring "Aerocosmos"*

Ionosphere characteristics in the area of Katrina Hurricane propagation (September 24 – 28, 2005) have been considered in this paper. Ionospheric parameters were determined using the ionosphere radio-translucence method (inclined paths) using GPS (Navstar) system. Graph of time variability of electron content over the Katrina hurricane at the moment of its highest intensity, as well as electron content maps and 3D ionosphere representations in the area of Katrina's propagation have been created using this method. Changes in spatio-temporal distribution of electron content over Katrina hurricane on August 28, 2005 have been revealed.

**Keywords:** hurricane, ionosphere, radio-translucence method, GPS.