

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

УДК 551.590.29

ВОЗДЕЙСТВИЕ КРУПНОМАСШТАБНЫХ АТМОСФЕРНЫХ ВИХРЕВЫХ ПРОЦЕССОВ НА ИОНОСФЕРУ НА ПРИМЕРЕ УРАГАНА KATRINA

© 2008 г. В. Г. Бондур¹, С. А. Пулинеш¹, Д. Узунов²

¹ГУ Научный центр аэрокосмического мониторинга "АЭРОКОСМОС" Минобрнауки РФ и РАН, Москва

²Центр космических полетов им. Годдарда, Гринбелт, Мэриленд, США

¹E-mail: vghondur@online.ru; pulse1549@mail.ru

Поступила в редакцию 23.06.2008 г.

Представлены результаты комплексного анализа данных аэрокосмического мониторинга параметров атмосферы и ионосфера в регионе прохождения урагана Katrina в интервале 23–30 августа 2005 г. Показано наличие связи между тропосферой и ионосферой, выражющееся в повышении электронной концентрации в максимуме слоя F ионосферы над центром урагана, вызываемое проникновением электрического поля от пространственного электрического заряда, формирующегося в верхней части урагана в результате усиления конвекции. Формирование неоднородности в ионосфере совпадает по времени с максимумом потока уходящего длинноволнового инфракрасного излучения, генерируемого также в верхней части урагана.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время все большее внимание уделяется исследованиям электромагнитных процессов внутри крупномасштабных атмосферных вихревых структур, таких, например, как ураганы [1]. Это связано, в первую очередь, с необходимостью уточнения понимания энергетики подобных образований, особенно на фазе их зарождения, а также улучшения качества моделирования критических процессов в атмосфере Земли [2]. Об интенсивности электромагнитных явлений внутри ураганов свидетельствует, например, тот факт, что электромагнитные квазистационарные [4, 5] и переменные [3] поля, обусловленные этими явлениями, зарегистрированы с помощью спутниковых измерений даже в верхней ионосфере. На периферии ураганов при ракетном зондировании обнаружены также вариации электронной плотности в нижней ионосфере [6].

Воздействие ураганов на ионосферу связано прежде всего с наличием пространственного заряда в его верхней части $\sim 4.4 \times 10^7$ Кн, и генерацией электрического поля исключительно высокой интенсивности (порядка сотен киловольт [1]), что сравнимо с разностью потенциалов между ионосферой и поверхностью Земли (от 250 до 450 кВ) [7]. Электрические поля такой интенсивности, обусловленные облачными структурами размерами порядка 200–500 км, могут проникать в ионосферу и создавать там неоднородности различных масштабов [8–10].

Генерация электрического поля связана с процессами электризации грозовых облаков, в результате которой происходит разделение зарядов. Для электризации облака необходимо выполне-

ние двух условий: наличие положительных и отрицательных ионов, а также эффективного механизма разделения зарядов. Основными причинами ионизации атмосферных газов являются энергичные частицы различного происхождения: галактические космические лучи (ГКЛ) [11], солнечные космические лучи (СКЛ) и высыпание энергичных частиц из радиационных поясов Земли [12]. Создание электрических зарядов может происходить также в результате интенсивно идущих внутри циклонов процессов испарения/конденсации влаги [13].

Несмотря на то, что процессы разделения зарядов в атмосфере достаточно широко освещены в литературе [14], их природа выявлена не до конца. Об этом свидетельствуют, например, обнаруженные недавно многослойные (в виде смены знака электрического заряда) структуры грозовых облаков [15]. Поэтому современные представления о процессах разделения зарядов в атмосфере требуют существенного уточнения.

Следует отметить еще один фактор, который может помочь в оценках энергетики урагана, в том числе интенсивности процесса ионизации. Помимо теоретических исследований, специальные лабораторные эксперименты показали, что не только аэрозольные частицы, но и ионы могут быть центрами конденсации водяного пара [16].

Тепло, выделяемое в процессе конденсации (скрытая теплота испарения), может быть оценено спутниковыми методами в инфракрасной (ИК) области спектра. Одним из наиболее надежных источников информации о количестве тепла на уровне верхнего слоя облаков служит уходящее длинноволновое ИК-излучение (Outgoing Long-

wave Radiation – OLR) [17]. Специальная методика выделения локальных аномалий OLR может быть использована для оценки теплового излучения, а, следовательно, и интенсивности процессов ионообразования, в верхней части тропических циклонов.

Из многообразия методов измерения параметров ионосферы наиболее адекватным представляется разработанный недавно метод восстановления вертикальной структуры электронной концентрации по данным навигационных спутниковых систем типа GPS [18–20]. Метод использовался, в основном, для выявления ионосферных аномалий перед сильными землетрясениями [19, 20]. Возможности этого метода спутникового мониторинга для выявления локальных аномалий электронной концентрации ионосферы были использованы в данной работе для исследования процессов электромагнитного взаимодействия тропосфера и ионосфера в результате развития кризисных атмосферных явлений, таких как интенсивные ураганы (на примере урагана Katrina).

РОЛЬ ТРОПОПАУЗЫ В ЭНЕРГЕТИКЕ УРАГАНА

Галактические космические лучи играют важную роль в формировании климата нашей планеты за счет модуляции облачного покрова [21]. Поскольку тропические циклоны представляют собой мощные облачные структуры, то должна существовать связь между изменениями потоков космических лучей и интенсивностью тропических циклонов. Статистически такая связь была установлена в работе [22], а физический механизм воздействия космических лучей на ураган описан в работе [23], где как раз был рассмотрен случай урагана Katrina. Оказалось, что основное взаимодействие происходит в верхней части урагана на уровне тропопаузы, где располагается максимум профиля ионообразования за счет ионизации космическими лучами [24]. В работе [23] было установлено, что уменьшение потока галактических космических лучей во время Форбуш-понижения приводит к понижению температуры воздуха на уровне тропопаузы (~16 км). Это связано с понижением уровня ионизации, приводящим к уменьшению выделения скрытой теплоты испарения молекул воды, присоединяющихся к вновь образуемым ионам.

Однако как профиль ионизации космическими лучами, так и энергетический спектр космических лучей являются статистическими характеристиками и могут сильно отличаться в различные моменты времени и в разных точках пространства. Статистические исследования, проведенные для различных пунктов метеозондирования в районе Северной Атлантики в течение сезона 2005 г., подтверждают картину пространственной

неоднородности эффектов влияния космических лучей. В случае урагана Katrina эта неоднородность отражается в пространственной анизотропии температуры, обнаруженной по данным станций метеозондирования.

Динамика развития урагана и его траектория, построенные по данным спутника GOES11, приведены на рис. 1 (см. на вклейках с цветн. рис.). Здесь же указаны значения температуры на высоте 10 км для семи станций метеозондирования. Из представленного рисунка видно, что максимальная разница температур на этой высоте превышает 5°C (станции TJSJ и EYW). Дополнительные исследования с привлечением данных других станций метеозондирования подтвердили вывод работы [23] о том, что тепловые эффекты Форбуш-понижения космических лучей неоднородны по пространству и наблюдаются на различных высотах и с разной интенсивностью.

Для определения тепловыделения в верхней части урагана нами использованы результаты спутникового мониторинга уходящего длинноволнового (10–14 мкм) ИК-излучения – OLR. Измерения проводились с помощью ИК-спектрометра AIRS, установленного на спутнике Aqua. Космические изображения в ИК-диапазоне позволяют проводить мониторинг положения урагана и его динамических параметров (скорости и направления движения). На рис. 2 (см. на вклейках с цветн. рис.) представлены распределения тепловых потоков для разных стадий развития урагана Katrina (показаны стрелками): фаза зарождения в регионе Багамских островов 24 августа 2005 г. (а); первая фаза усиления после магнитной бури 25 августа 2005 г. (б); фаза входа в Мексиканский залив после прохождения по п-ову Флорида 26 августа 2005 г. (в); фаза максимального развития урагана, когда он достиг 5-й категории 28 августа 2005 г. (г). Данные получены дляочных пролетов спутника Aqua в моменты времени 01:30. На рис. 2 показаны разности между измеренными потоками уходящего ИК-излучения OLR и средним семилетним уровнем, вычисленным путем обработки данных AIRS за 2002–2008 гг.

Анализ результатов измерений, представленных на этом рисунке, показывает, что тепловой поток из верхней части урагана Katrina намного выше, чем в окружающей части атмосферы. Это свидетельствует о намного более интенсивном процессе конденсации влаги в урагане. В течение 24 августа 2005 г. (см. рис. 2а) имело место слабое усиление циклонической активности в зоне над Багамскими островами и превращение области пониженного давления в тропический циклон Katrina. Структура, обозначенная на рис. 2а стрелкой, имеет протяженный характер, а потоки тепла не превышают величины 20 Вт/м². При

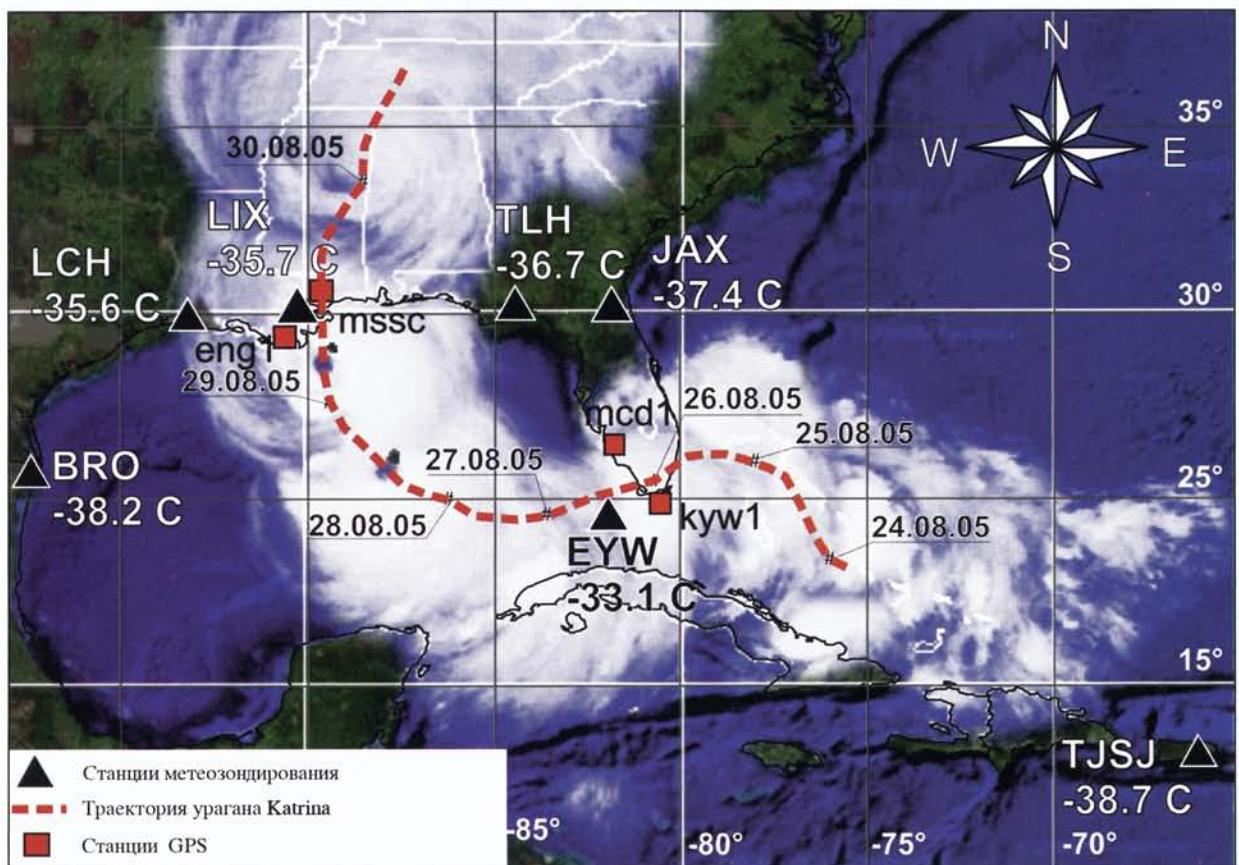


Рис. 1. Динамика развития и траектория урагана Katrina, построенная по данным спутника GOES-11. Положение станций метеорологического зондирования обозначено черными треугольниками, рядом указаны значения температуры воздуха на высоте 10 км по данным этих станций. Положение приемников GPS обозначено красными квадратами.

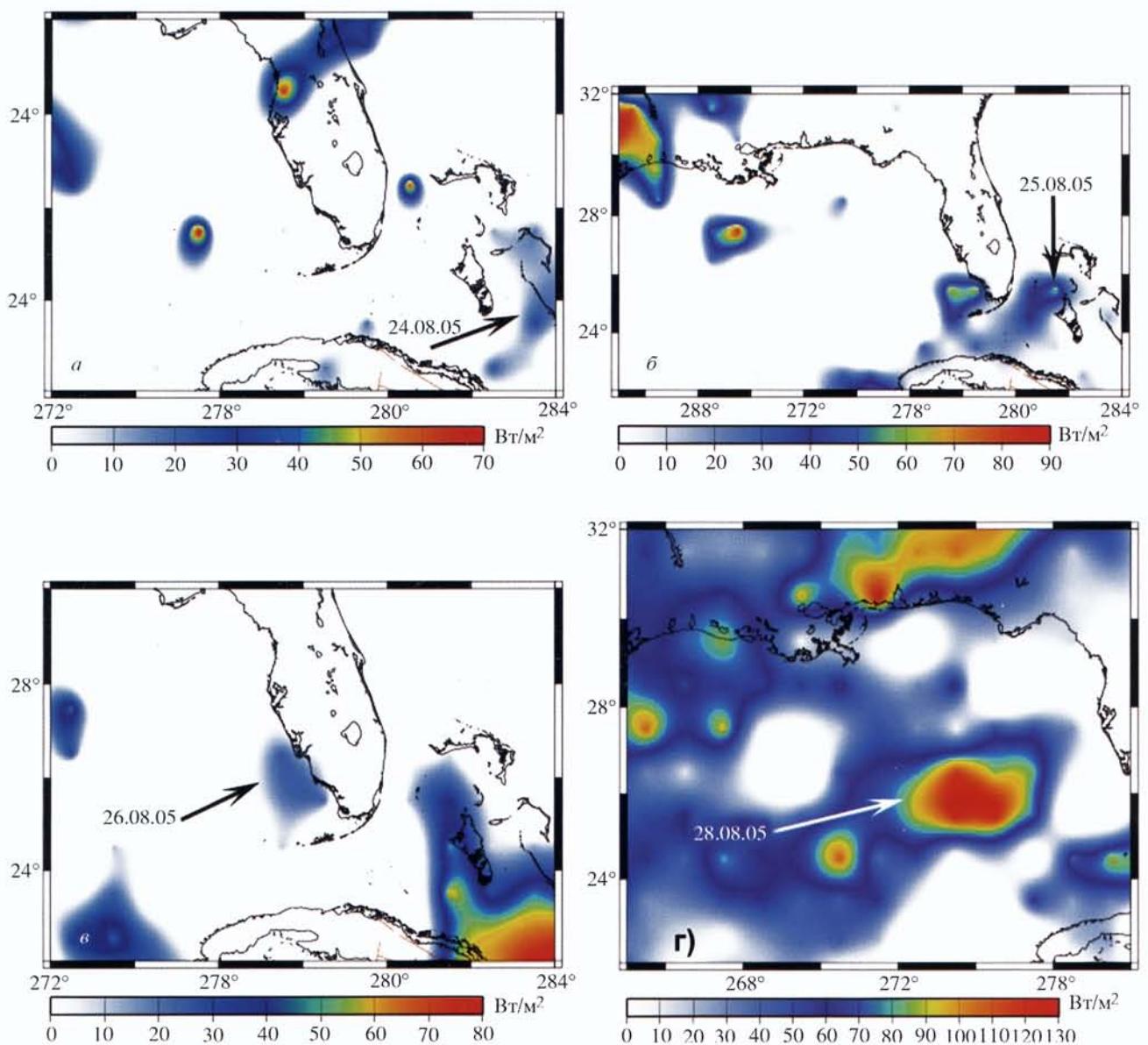


Рис. 2. Распределение отклонения от среднего (за 2002–2008 г.) значения уходящего потока длинноволнового инфракрасного излучения (OLR), построенное по данным прибора AIRS спутника Aqua (Bt/m^2) на разных стадиях развития урагана Katrina: *а* – 24 августа 2005 г.; *б* – 25 августа 2005 г.; *в* – 26 августа 2005 г.; *г* – 28 августа 2005 г.

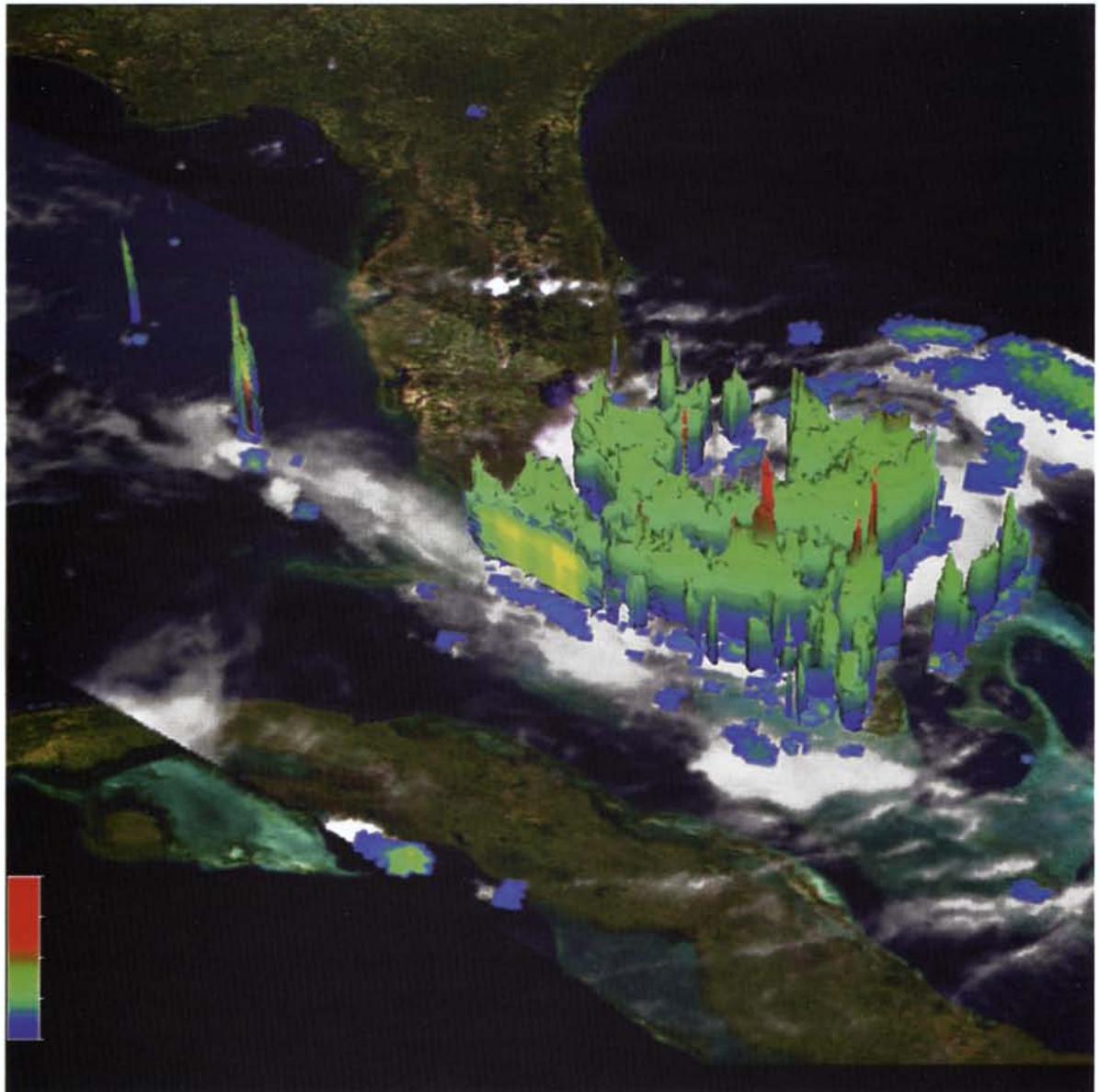


Рис. 3 а

Рис. 3. Трехмерные распределения интенсивности осадков в урагане Katrina по данным зондирования со спутника TRMM: а – 5 августа 2005 г.; б – 28 августа 2005 г. Красным цветом отмечены конвективные бани, достигающие высоты 20 км [http://trmm.gsfc.nasa.gov/publications_dir/katrina_aug05_no2.html]

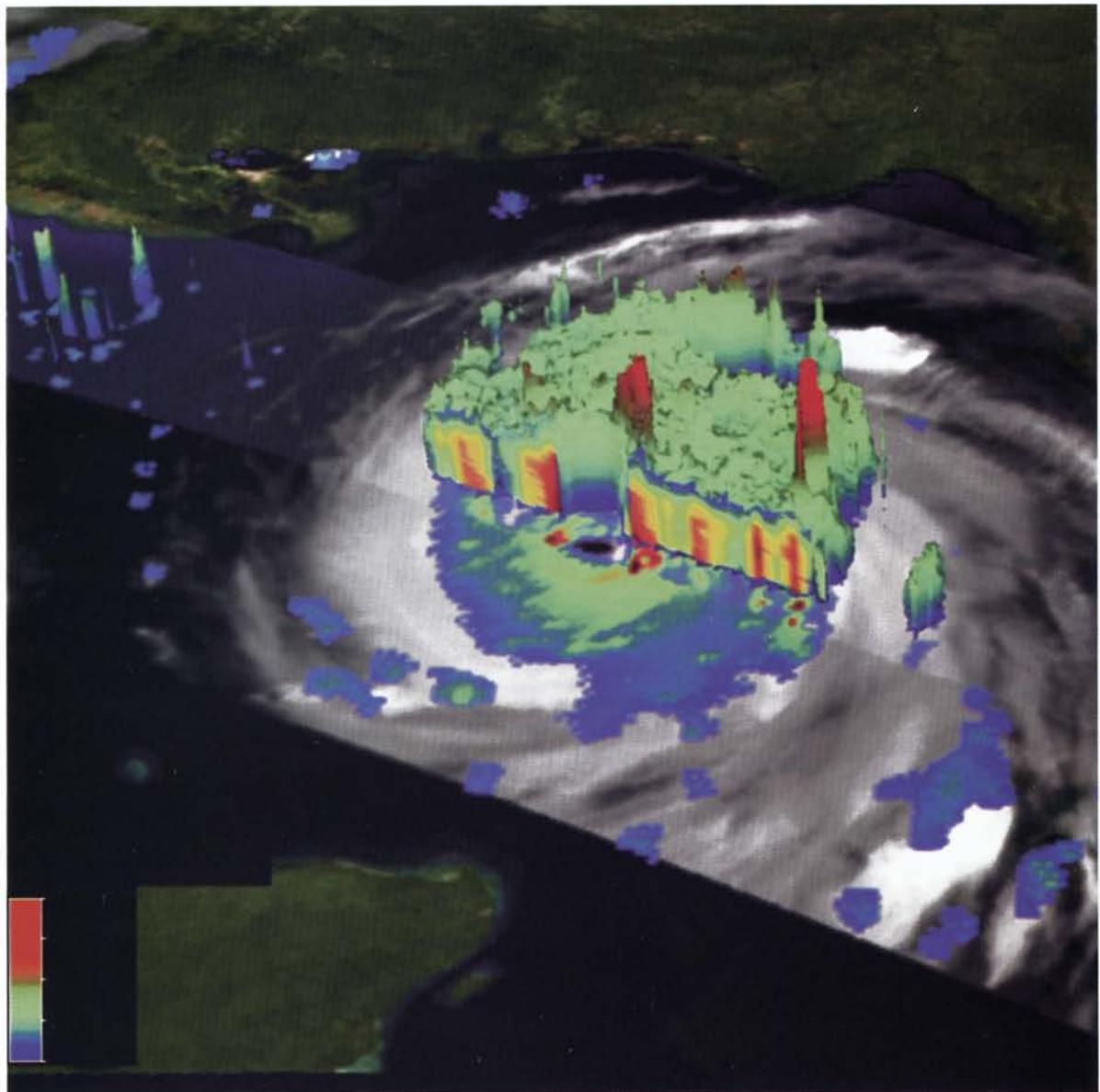


Рис. 3 б

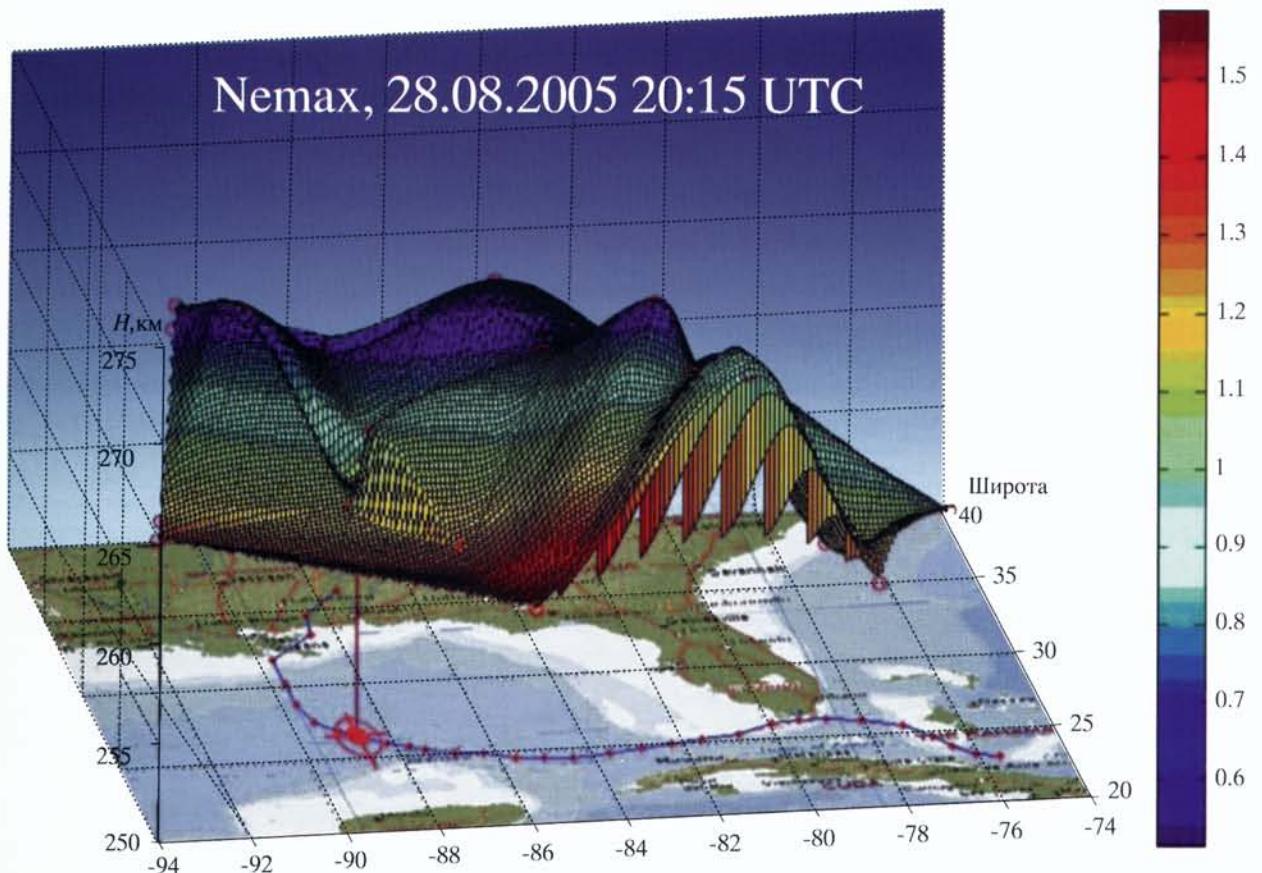


Рис. 10. Трехмерное представление положения высоты максимума электронной концентрации H_mF2 в слое $F2$ для 28 августа 2005 г. (интервал времени 20:00–20:30 UT). Цветная шкала справа – электронная концентрация $N_e(\times 10^6 \text{ см}^{-3})$.

этом потоки тепла от отдельных гроз в Мексиканском заливе и на полуострове Флорида имеют значения, превышающие тепловыделение из циклона. В этот период Katrina достигла уровня урагана 1-й категории перед соприкосновением с сушей.

Одной из возможных причин последующего усиления урагана считается магнитная буря, имевшая место 24–25 августа 2005 г. и последующее усиление конвекции, связанное с вариациями потока галактических космических лучей [23]. Об усилении урагана свидетельствует увеличение потока OLR, выявленное на распределении, полученном для 25 августа (см. рис. 2б). Здесь заметно появление концентрической структуры. После незначительного ослабления к вечеру 26 августа 2005 г. ураган вошел в воды Мексиканского залива (см. рис. 2б). Форма аномалии стала иметь более сконцентрированный характер, однако величина теплового потока из верхней части урагана уменьшилась до величины, характерной для стадии зарождения.

Совершенно другая картина наблюдается 28 августа 2005 г. (см. рис. 2г). В этот день существенно увеличилось тепловыделение как со всей поверхности океана, так и из самого урагана. Поток тепла из урагана достиг величины 130 Вт/м², т.е. в 6.5 раз превысил значения, полученные 24 и 26 августа 2005 г. Это свидетельствует о высокой интенсивности процесса конденсации внутри урагана, что вызывало увеличение осадков и привело к разделению электрических зарядов внутри урагана.

ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ УРАГАНА И ПРОНИКНОВЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ИОНОСФЕРУ

Для оценки интенсивности осадков в тропических широтах нами использовались данные спутника TRMM (NASA). На рис. 3 (см. на цветн. вклейках) приведены распределения интенсивности осадков внутри урагана Katrina по данным спутникового зондирования для 25 и 28 августа 2005 г. Эти данные позволили обнаружить формирование внутри ураганов так называемых горячих башен (hot towers), или конвективных взрывов (convective bursts) [25, 26], – вертикальных структур усиленной конвекции с интенсивными осадками. Такие конвективные башни достигают 20 км (отмечено красным цветом на рис. 3).

Как известно, конвективный механизм является основным механизмом электрификации грозовых облаков [14]. Более тяжелые капли с отрицательным зарядом выпадают в виде осадков, а в верхней части грозового облака остаются более легкие частицы, несущие положительный заряд. Существенный вклад в электризацию вносит так-

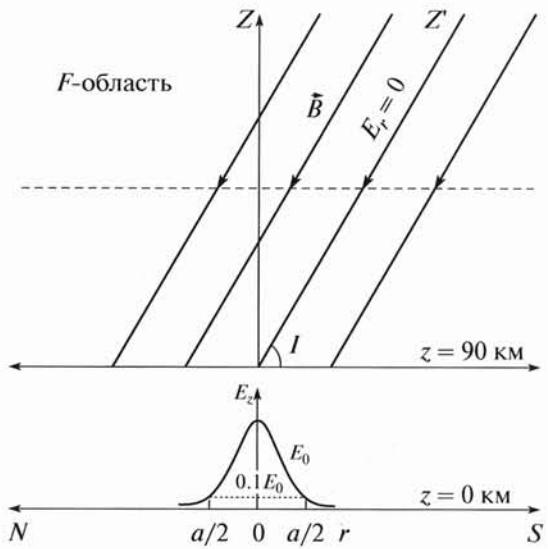


Рис. 4. Схема расчета проникновения электрического поля в ионосферу Земли.

же трибо-эффект – электризация трением при формировании частиц льда.

Электризацию урагана подтверждает также высокая грозовая активность, отмеченная в тропическом циклогенезе Северной Атлантики в 2005 г., в том числе и в урагане Katrina. Об этом свидетельствуют данные, полученные с помощью самолета ER-2 [27]. Более подробные измерения, проведенные при пролете над ураганом Эмили, позволили выявить до нескольких молниевых разрядов в минуту в цилиндрической стенке урагана, окружающей его глаз. В работе [27] зарегистрировано экстремальное значение постоянного электрического поля, когда-либо регистрировавшегося над грозовым облаком, которое составляло порядка 8 кВ/м.

Теоретические расчеты проникновения постоянного электрического поля с поверхности земли (или грозового облака) в ионосферу, проведенные в работах [9, 10], показали, что пороговым значением, при котором постоянное электрическое поле может быть зарегистрировано в ионосфере, являются радиус области с аномальным электрическим полем ~200 км и электрическое поле напряженностью 1 кВ/м. Схема расчета представлена на рис. 4. На этом рисунке использованы следующие обозначения: r – радиус; a – радиус зоны с аномальным значением электрического поля; E_0 – максимальная напряженность поля в центре аномалии, спадающая по закону

$$E_z = E_0 \exp \{-d(r/a)^2\}.$$

В приближении горизонтальной стратификации среды и вертикального направления геомагнитного поля из уравнения непрерывности для электрического тока можно получить уравнение

для изменения электрического потенциала ϕ с высотой z

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2}\phi + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\phi + \frac{1}{\sigma_1}\frac{\partial}{\partial z}\left(\sigma_0\frac{\partial}{\partial z}\phi\right) = 0, \quad (1)$$

где σ_1 — проводимость Педерсена; σ_0 — проводимость вдоль геомагнитного поля.

Распределение проводимости по высоте задается в соответствии с экспериментально полученными профилями [29]. Из общего решения уравнения (1) для потенциала, полученного в работах [9, 10], с учетом того, что силовые линии геомагнитного поля на высотах $z \geq 90$ км эквипотенциальны, получим выражение электрического поля для этих высот:

$$E_r = -\frac{\partial}{\partial r}\phi \Big|_{z=90 \text{ км}} = \int_0^{\infty} J_1(kr)\{A_2(k)I_v(kf)|_{z=90 \text{ км}} + \\ + B_2(k)K_v(kf)|_{z=90 \text{ км}}\}f' \Big|_{z=90 \text{ км}} dk, \quad (2)$$

где J_1 — функция Бесселя первого рода первого порядка; I_v , K_v — модифицированные функции Бесселя первого и второго рода соответственно порядка v ; f и v — комбинации характерных высот, определяющих распределение электрического потенциала; k имеет смысл волнового числа в приближении постоянного поля и имеет размерность, обратную r .

Коэффициенты A_2 и B_2 находятся из граничных условий:

$$\frac{\partial}{\partial r}\phi \Big|_{z=0} = E_0 \exp\{-d(r/a)^2\};$$

непрерывность ϕ при $z=z_1$; $\frac{\partial}{\partial r}\phi \Big|_{z=90 \text{ км}} = 0$.

Для ночных условий, когда эффективность проникновения электрического поля в ионосферу выше, его величина будет составлять ~ 8 мВ/м, если принять, что радиус урагана $r_H \sim 200$ км, а величина электрического поля в верхней части урагана $E_r^{\max} \sim 8$ кВ/м.

Это соответствует результатам работы [5], в которой проводились экспериментальные измерения электрического поля в ионосфере над тайфуном Гарри (7–19 февраля 1989 г.) с борта советского спутника “Космос 1809”. В этих измерениях получена величина электрического поля, равная 7–8 мВ/м. Поля такого порядка наблюдаются в ионосфере во время геомагнитных возмущений и формируют в ней неоднородности электронной концентрации. Приведенная оценка для электрического поля позволяет ожидать наличия ионосферных неоднородностей над ураганами.

ИОНОСФЕРНАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ НАД УРАГАНОМ КАТРИНА

Для получения распределения электронной концентрации над областью прохождения урагана Katrina использовалась методика двухчастотного радиопросвечивания на трассе спутник—наземный пункт, разработанная в [18–20]. Эта методика позволяет получать высотные профили распределения электронной концентрации ионосферы Земли в подорбитальном пространстве космического аппарата. В данном случае использовались двухчастотные сигналы спутниковой навигационной системы GPS.

В работе [19] показано, что при проведении измерений на двух частотах в предположении локальной сферически-слоистой среды разность псевдодальнестей связана с функцией высотного распределения электронной концентрации $N(z)$ следующим образом:

$$\int_{z_1}^{z_2} N(z) \frac{(a+z)dz}{[(a+z)^2 - a^2 \sin^2 \vartheta]^{\frac{1}{2}}} = \\ = 2.475 \times 10^{-8} \frac{f_1^2}{k} [\Delta R(f_1, f_2) - \delta], \quad (3)$$

где z_1 и z_2 — нижняя и верхняя границы ионосферы, z — текущая высота; ϑ — зенитный угол наблюдения спутника из пункта измерений; a — радиус Земли; δ — погрешность радиотехнических измерений; $f_{1,2}$ — навигационные частоты; $k = (f_1/f_2)^2$.

Решение обратной задачи радиопросвечивания сводится к задаче нахождения конечномерного вектора, минимизирующего функционал, определяемый следующим выражением [18, 19]:

$$\Phi(\phi) = \|A\phi - U_\delta\|_{L_2}^2. \quad (4)$$

Здесь A — интегральный оператор $\phi \equiv N(z)$; U_δ — данные радиотехнических измерений; L_2 — вторая несущая частота навигационной системы.

При проведении исследований профилей электронной концентрации в области прохождения урагана Katrina анализировались данные навигационных спутников, вертикальная проекция подионосферных точек которых проходила над местоположением урагана. Подионосферные точки рассчитывались по данным стационарных наземных приемников GPS, расположенных вблизи прохождения урагана. Для детального анализа был выбран спутник № 19, сигналы которого принимались наземной опорной станцией *eng1* сети международной службы GPS (International GPS Service-IGS) (см. рис. 5) (далее в тексте названия приемных станций GPS приводятся в соответствии с международным каталогом IGS). Это обусловлено тем, что расположение станции *eng1* и подспутниковой точки спутника № 19 навигационной системы GPS позволяли получить распределение электронной концентрации

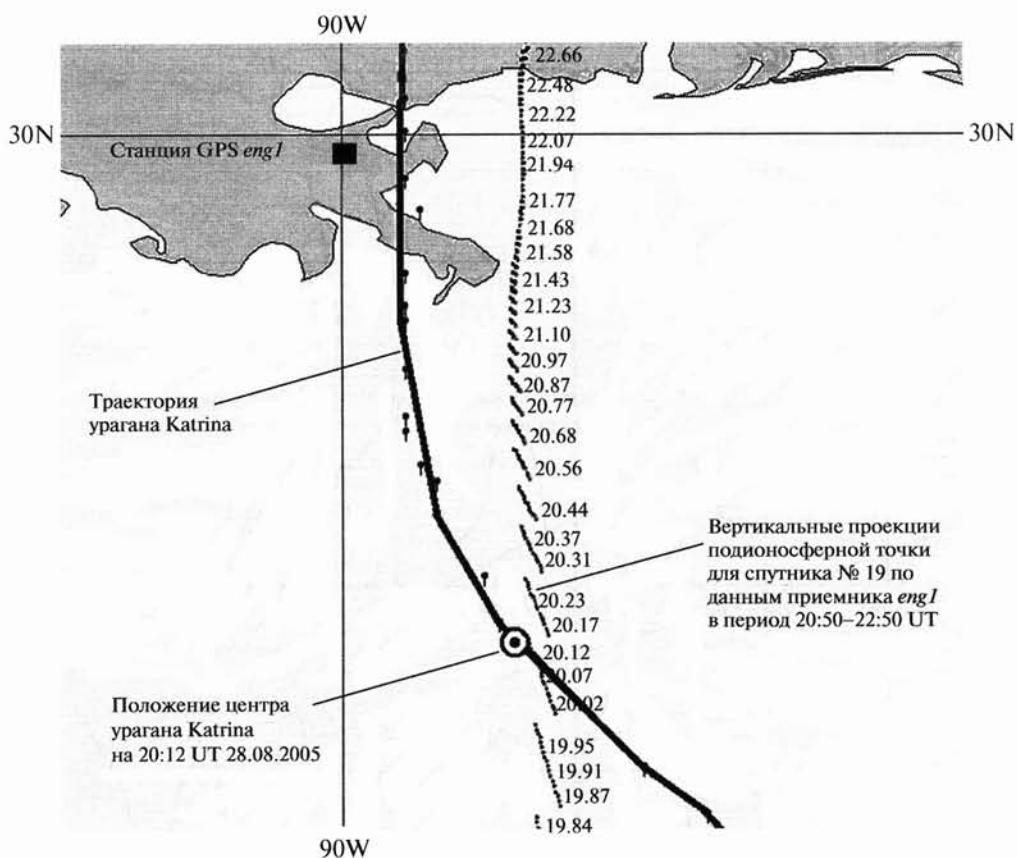


Рис. 5. Фрагмент карты с траекторией урагана Katrina и вертикальными проекциями подионосферной точки для спутника № 19 системы GPS при приеме на наземную опорную станцию eng1.

над ураганом Katrina 28 августа 2005 г., когда он достиг наибольшей интенсивности.

В процессе анализа сначала проводились расчеты максимумов электронной концентрации в слое ионосфера $F2$ для подспутниковой точки в период с 24 по 28 августа 2005 г. Результаты этих расчетов показаны на рис. 6. Пониженные значения электронной концентрации 24 августа 2005 г. связаны с реакцией ионосферы на внезапное начало магнитной бури. Положительная фаза реакции ионосферы на магнитную бурю отмечалась 25 августа 2005 г. в утренние часы местного времени. Поскольку на рис. 6 показаны послеполуденные часы, разница между значениями электронных концентраций во время положительной фазы 25 августа 2005 г. и на фазе восстановления 26–28 августа 2005 г. незначительна. Это можно видеть также на рис. 7б, в, г, где показаны вариации полного электронного содержания (TEC) на трех наземных станциях GPS (*eng1, mcd1, kyu1*), находящихся в регионе прохождения урагана.

Из графика экваториального геомагнитного индекса D_{st} , приведенного на рис. 7а, можно видеть развитие магнитной бури с 24 по 26 августа 2005 г. Отмеченные на рис. 7 жирной штриховкой и вертикальными линиями интервал внезапного начала и главной фазы магнитной бури, а также графики вариаций TEC, приведенные на рис. 7б–г,

позволяют отчетливо проследить реакцию ионосферы: сначала уменьшение полного электронного содержания 24 августа 2005 г. (отрицательная фа-

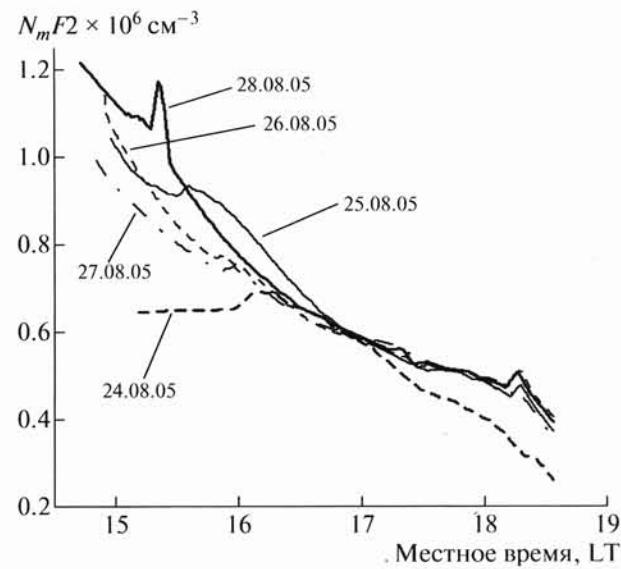


Рис. 6. Вариации электронной концентрации N_m в максимуме слоя $F2$ по данным спутника № 19 для интервала 24–28 августа 2005 г.

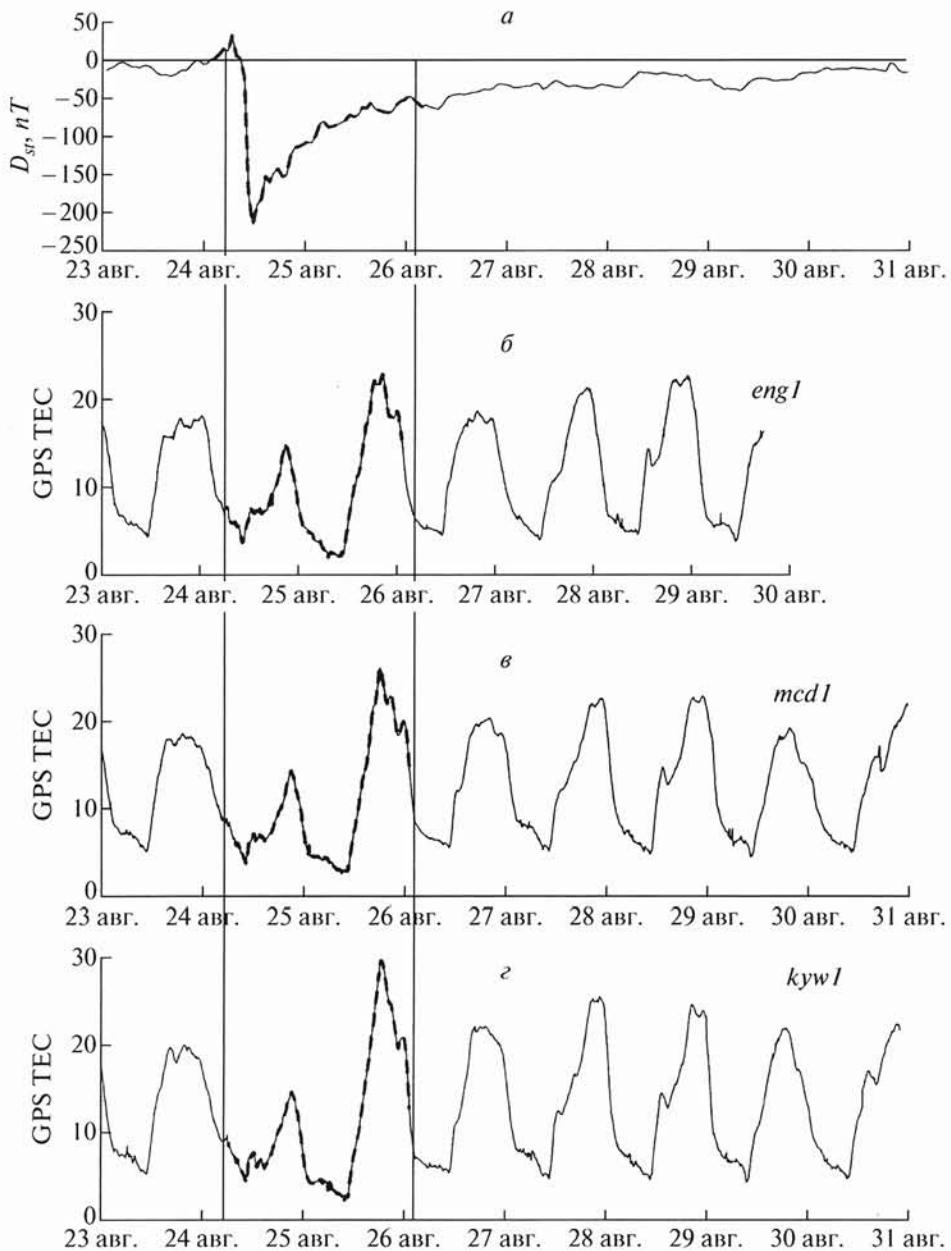


Рис. 7. Вариации полного электронного содержания (GPS TEC) по данным трех приемников сети IGS для периода с 23 по 28 августа 2005 г. (б, в, г): а – экваториальный индекс геомагнитной активности D_{st} ; б – данные станции *engI*; в – данные станции *mcdI*; г – данные станции *kywI*. Жирной штриховой линией и вертикальными линиями отмечен период внезапного начала и главной фазы магнитной бури.

за), а затем увеличение полного электронного содержания 25 и 26 августа 2005 г. (положительная фаза) по сравнению с невозмущенными днями.

Как видно из рис. 6, 28 августа 2005 г. в момент прохождения подионосферной точки спутника № 19 над ураганом (местное время 15 ч 15 мин–15 ч 20 мин, LT) электронная концентрация резко увеличилась (острый максимум на кривой от 28.08.2005).

Данное явление было подвергнуто более тщательному анализу. Для этого рассчитывались вертикальные профили электронной концентрации

N_e по приведенной выше методике двухчастотного радиопросвечивания [19]. Восстановленные профили на различных расстояниях от центра урагана Katrina 28 августа 2005 г. показаны на рис. 8. Оказалось, что максимум электронной концентрации, выявленный на рис. 6, соответствует опусканию слоя $F2$ на несколько километров над ураганом. Это подтверждает рис. 8, где показана высота максимума H_mF2 слоя $F2$ для различных точек в окрестности центра урагана. При построении профилей выбирались подспутниковые точки в направлении на север, на восток

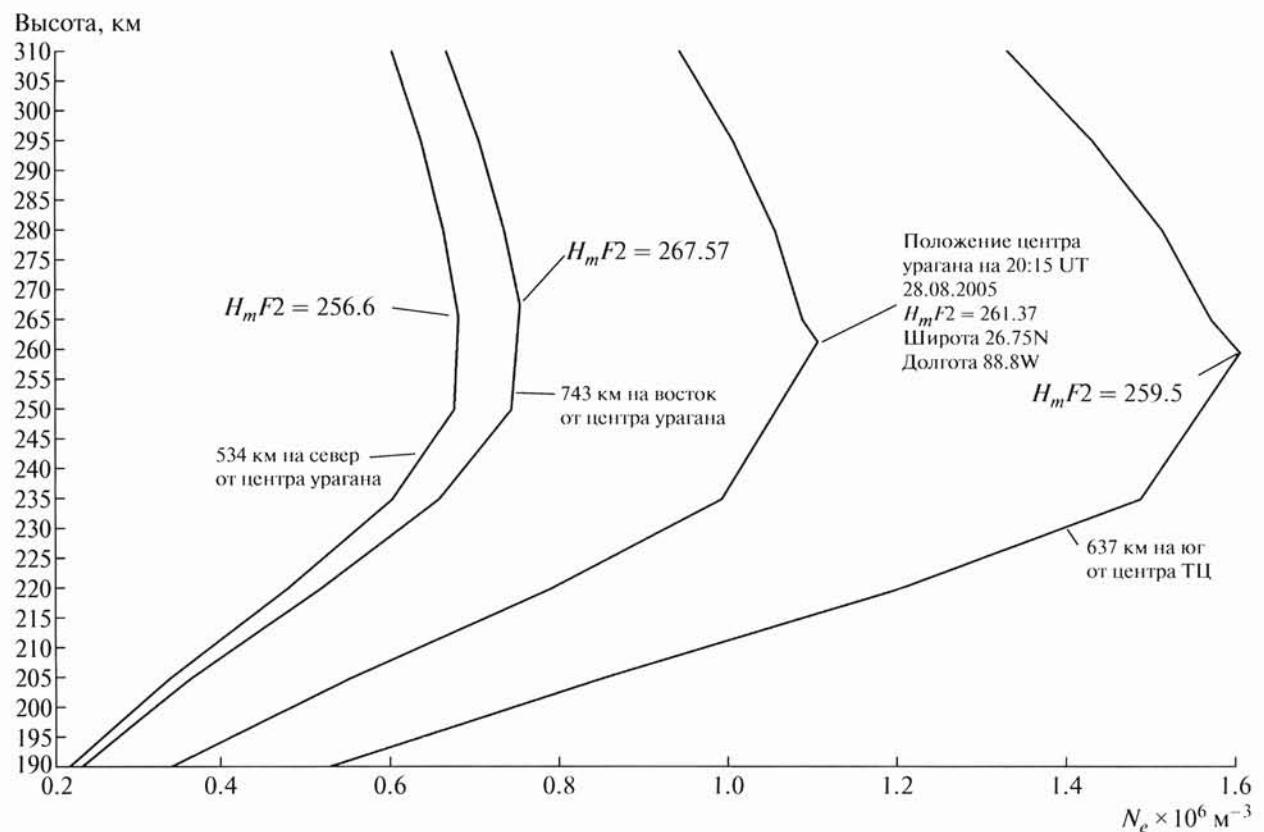


Рис. 8. Восстановленные методом двухчастотного радиопросвечивания [19] (по данным спутниковой навигационной системы GPS) вертикальные профили электронной концентрации N_e на различных расстояниях от центра урагана Katrina.

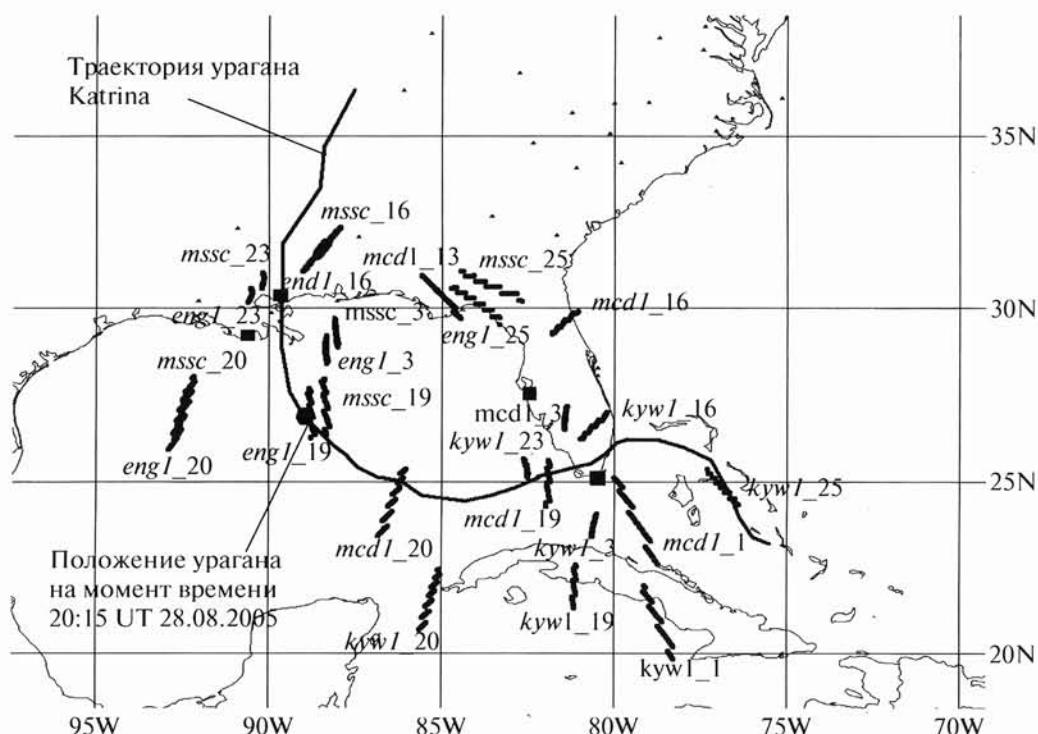


Рис. 9. Карта участков вертикальных проекций подионосферных точек, полученных для разных спутников GPS (названия станций и номера спутников указаны на рисунке) для интервала времени 20:00–20:30 UT 28 августа 2005 г.

и на юг от центра урагана. Из приведенных данных видно, что высота максимума электронной концентрации для всех точек, кроме южной, выше высоты максимума над центром урагана. Понижение высоты слоя с широтой соответствует модели ионосферы и подтверждается экспериментальными исследованиями вертикальных профилей электронной концентрации в окрестности ее максимума в слое $F2$ [28].

Для детального исследования пространственного распределения электронной концентрации ионосферы 28 августа 2005 г. для интервала времени 15–15:30 LT (соответствует интервалу 20–20:30 UT) проводились расчеты ионосферных параметров с достаточно высоким разрешением. С этой целью использовались данные со всех наземных станций GPS, находящихся в регионе (см. рис. 1). Для каждого из спутников GPS, находящихся над горизонтом, по данным всех используемых приемных станций были рассчитаны величина концентрации в максимуме слоя $F2$ – $N_m F2$ и высота максимума слоя $F2$ $H_m F2$ для участков траекторий, вертикальная проекция подионосферных точек которых находилась в окрестности траектории урагана Katrina в интервале времени 20–20:30 UT. Эти участки показаны на рис. 9, где рядом с каждой траекторией обозначены номер спутника и приемник, с помощью которого были получены ионосферные параметры.

Трехмерное распределение высоты максимума электронной концентрации, имевшее место над ураганом Katrina 28 августа 2005 г., представлено на рис. 10 (на цветн. вклейках). Величина электронной концентрации показана цветом. На этом рисунке отчетливо видно образование специфической воронки над центром урагана. Хотя изменения высоты максимума по абсолютной величине сравнительно невелики (~6.5 км), однако важен факт опускания слоя F точно над центром урагана. Следует отметить, что достоинством методики, разработанной в [19], являются возможность восстановления вертикальных профилей электронной концентрации и выявления высоты ее максимума в слое $F2$ в подионосферной точке (в рамках используемого приближения). Поэтому полученное распределение в виде воронки, имеющей диаметр порядка 200 км, является реально измеренным распределением высоты максимума электронной концентрации слоя $F2$ над ураганом.

Анализ индивидуальных профилей электронной концентрации, приведенных на рис. 8, показал, что понижение высоты максимума $H_m F2$ сопровождается изменением (уменьшением) шкалы высот ионосферы (величины, обратной скорости изменения электронной концентрации с высотой). Этот результат соответствует эмпирически полученной корреляции между шкалой высот ионосферы и высотой максимума электронной концентрации [27]. Образование ионосферной аномалии над ураганом связано с физическим механизмом воздействия сильного аномального электриче-

ского поля. Электрическое поле в ионосфере приводит к направленному движению частиц: при наличии продольной компоненты электрического поля будут вызываться интенсивные потоки вдоль силовых линий геомагнитного поля, поперечная компонента электрического поля будет вызывать дрейф частиц в скрещенных электрическом и геомагнитных полях. В обоих случаях потоки частиц вызывают эффективное уменьшение термодинамической температуры плазмы, что приводит к уменьшению шкалы высот, которая пропорциональна термодинамической температуре.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексный анализ аэрокосмических и спутниковых данных в период прохождения урагана Katrina над акваториями Атлантического океана и Мексиканского залива позволил выявить наличие атмосферно-ионосферных связей, проявляющихся в следующем:

1) интенсивная конвекция в области стенок урагана и образующихся тепловых башен приводит к увеличению процессов конденсации и выделению скрытой теплоты испарения. Это регистрируется с помощью ИК спутниковых спектрометров в виде потоков уходящего длинноволнового инфракрасного излучения OLR;

2) одновременно процессы конвекции и конденсации являются эффективными механизмами разделения электрических зарядов и накопления пространственного электрического заряда в верхней части урагана. Экспериментально зарегистрированная величина электрического поля над ураганами в сезоне 2005 г. составляла 8 кВ/м;

3) вертикальное электрическое поле, создаваемое ураганом, проникает в ионосферу и создает аномалии в вертикальном распределении электронной концентрации: формирование максимума электронной концентрации над центром урагана, а также понижение высоты главного максимума ионосферы (в слое $F2$) и уменьшение шкалы высот;

4) проведенные исследования и анализ их результатов являются доказательством наличия связей между тропосферой и ионосферой Земли и существования сложных электромагнитных процессов в крупномасштабных вихревых структурах.

5) продемонстрирована высокая эффективность дистанционных методов мониторинга для исследования таких критических процессов в атмосфере Земли как тропические циклоны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Krasilnikov E. Y. Electromagnetic nature of tropical cyclones, hurricanes and tornadoes // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. № D12. P. 13.571–13.580.
2. Артемаха С.Н., Ерохин Н.С. О связи крупномасштабных атмосферных вихревых процессов с электромагнитными явлениями // Электромагнитные явления. 2005. Т. 5. № 1. С. 3–20.

3. Burke W.J., Aggson T.L., Maynard N.C. et al. Effects of a lightning discharge detected by the DE-2 satellite over Hurricane Debbie // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. P. 6359–6367.
4. Исаев Н.В., Сорокин В.М., Чмырев В.М., Серебрякова О.Н. Электрические поля в ионосфере, связанные с морскими штормами и тайфунами // Геомагнетизм и аэрономия. 2002. Т. 42. № 5. С. 670–675.
5. Sorokin V.M., Isaev N.V., Yaschenko A.K. et al. Strong DC electric field formation in the low latitude ionosphere over typhoons // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2005. V. 67. P. 1331–1342.
6. Ванина-Дарт Л.Б., Покровская И.В., Шарков Е.А. Исследование взаимодействия нижней экваториальной ионосферы с тропическими циклонами по данным дистанционного и ракетного зондирования // Иссл. Земли из космоса. 2007. № 2. С. 19–27.
7. Bering III E.A., Few A.A., Benbrook J.R. The Global Electric Circuit // 1998. Physics Today. V. 51. № 10. P. 24–30.
8. Hegai V.V., Kim V.P., Illich-Svitych P.V. The formation of a cavity in the night-time midlatitude ionospheric E-region above a thundercloud // Planet. Space Sci. 1990. V. 38. P. 703–707.
9. Пулинец С.А., Хегай В.В., Боярчук К.А., Ломоносов А.М. Атмосферное электрическое поле как источник изменчивости ионосферы // Успехи физ. наук. 1998. Т. 41. № 5. С. 515–522.
10. Pulinets S.A., Boyarchuk K.A., Hegai V.V. et al. Quasielectrostatic Model of Atmosphere–Thermosphere–Ionosphere Coupling // Adv. Space Res. 2000. V. 26. № 8. P. 1209–1218.
11. Palle E., Butler C.J., O'Brien K.J. The possible connection between the ionization in atmosphere by cosmic rays and low level clouds // Atm. Sol. Terr. Phys. 2004. V. 66. P. 1779–1790.
12. Лучков Б.И. Солнечное влияние на земную погоду // Научная сессия МИФИ-2006. Сб. научных трудов. М., 2006. С. 79–80.
13. Балдачан М.Я. О разделении зарядов при испарении воды с земной поверхности // ДАН СССР. 1991. Т. 316. № 6. С. 1358–1361.
14. Beard K.V.K., Ochs H.T. Charging mechanisms in clouds and thunderstorms // The Earth's Electrical Environment. Washington, DC: Natl. Acad. Press, 1986. P. 114–130.
15. Мареев Е.А., Трахтенберг В.Ю. Загадки атмосферного электричества // Природа. 2007. № 3. С. 73–80.
16. Svensmark H., Pedersen J.O.P., Marsch N.D. et al. Experimental evidence for the role of ions in particle nucleation under atmospheric conditions // Proc. R. Soc. A. 2007. V. 463. P. 385–396.
17. Ouzounov D., Liu D., Kang C. et al. Outgoing Long Wave Radiation Variability from IR Satellite Data Prior to Major Earthquakes // Tectonophysics. 2007. V. 431. Is. 1–4. P. 211–220.
18. Смирнов В.М. Решение обратной задачи радиопрозвучивания ионосферы Земли градиентными методами // Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46. № 1. С. 47–52.
19. Бондуров В.Г., Смирнов В.М. Метод мониторинга сейсмоопасных территорий по ионосферным вариациям, регистрируемым спутниковыми навигационными системами // Докл. РАН. 2005. Т. 402. № 5. С. 675–679.
20. Bondur V.G., Smirnov V.M. I Int. Symp. on Rem. Sen. of Environment, St.-Petersburg, June 20–24 2005. CD-R. 4 p.
21. Svensmark H., Friis-Christensen E. Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage—a missing link in solar-climate relationships // J. Atm. Solar-Terr. Phys. 1997. V. 59. № 11. P. 1225–1232.
22. Pérez-Peraza J., Kavlakov S., Velasco V. et al. Solar, geomagnetic and cosmic ray intensity changes, preceding the cyclone appearances around Mexico // Adv. Space Res. 2008. doi:10.1016/j.asr.2007.12.004
23. Бондуров В.Г., Пулинец С.А., Ким Г.А. О роли вариаций галактических космических лучей в тропическом циклогенезе на примере урагана Katrina // Докл. РАН. 2008. Т. 422. № 2. С. 311–316.
24. Gringel W., Rosen J.M., Hofmann D.J. Electrical Structure from 0 to 30 Kilometers // The Earth's Electrical Environment. Washington, DC: Natl. Acad. Press, 1986. P. 166–182.
25. http://trmm.gsfc.nasa.gov/publications_dir/katrina_aug05_no2.html
26. Young K. Satellites spot “hot towers” in Hurricane Katrina // New Scientist. <http://space.newscientist.com/article/dn7929>
27. Barry P.L., Phillips T. Electric Hurricanes // http://science.nasa.gov/headlines/y2006/09jan_electric hurricanes.htm
28. Liu L., Wan W., Ning B. A study of the ionogram derived effective scale height around the ionospheric hmF2 // Ann. Geophys. 2006. V. 24. P. 851–860.
29. Cole R.K. Jr., Pierce E.T. Electrification in the Earth's atmosphere for altitudes between 0 and 100 kilometers // J. Geophys. Res. 1965. V. 70. № 12. P. 2735–2749.

Ionospheric Effect of Large-Scale Atmospheric Vortex by the Example of Hurricane Katrina

V. G. Bondur¹, S. A. Pulinets¹, D. Uzunov²

¹SE Aerocosmos Scientific Center for Aerospace Monitoring Ministry of Education and Science RAS, Moscow, Russia

²NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, USA

The results of the complex analysis of the aerospace monitoring data for the region of hurricane Katrina passing in August 2005 are presented. Troposphere-ionosphere coupling is demonstrated which is expressed in the increase of electron concentration in the F-layer maximum over the hurricane center, which is caused by penetration in the ionosphere of the electric field from the space electric charge formed at the top of the hurricane as a result of the convection growth. The ionospheric irregularity formation coincides in time with the maximum outgoing longwave radiation (OLR) flux generated also the hurricane top.