

В.Г. Бондур, С.А. Пулинец

Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга «АЭРОКОСМОС»,  
Москва, Россия,  
105064, Москва, Гороховский пер., 4, E-mail: vgbondur@aerocosmos.info

## **ВОЗДЕЙСТВИЕ МЕЗОМАСШТАБНЫХ АТМОСФЕРНЫХ ВИХРЕВЫХ ПРОЦЕССОВ НА ВЕРХНЮЮ АТМОСФЕРУ И ИОНОСФЕРУ ЗЕМЛИ.**

### **АННОТАЦИЯ**

В настоящей работе рассматриваются механизмы зарождения и интенсификации таких мезомасштабных атмосферных вихревых процессов, как тропические циклоны (ТЦ), связанные с ионизацией, а также процессы их электромагнитного взаимодействия с ионосферой Земли. Приведен обзор различных моделей ТЦ, в том числе учитывающих процессы ионизации. Проанализирован механизм, учитывающий спиральное поле скоростей при формировании ТЦ, а также физический механизм, объясняющий установленную статистическую связь кратковременных вариаций галактических космических лучей (Форбуш-понижений) с частотой зарождения и усиления ТЦ. Показано, что такое воздействие обусловлено уменьшением ионообразования во время Форбуш-понижений на уровне тропопаузы, а соответственно, понижением температуры на уровне верхней кромки облаков за счет уменьшения выделения скрытой теплоты, связанной с конденсацией влаги на вновь образуемых ионах. Этот процесс приводит к резкому увеличению разницы температур между поверхностью океана и верхней частью тропической депрессии, и, соответственно, к увеличению вертикальной конвекции, что приводит к интенсификации циклона. Делается вывод о том, что при исследовании мезомасштабных вихревых процессов в атмосфере следует учитывать не только гидродинамические процессы, но также термодинамические и электромагнитные свойства этих структур.

### **ПРОБЛЕМА ВОЗНИКНОВЕНИЯ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР**

Теория зарождения и динамики тропических циклонов (ТЦ) развивалась вначале в рамках классической гидродинамики и термодинамики атмосферы [1–3]. При этом моделирование осуществлялось с заданными начальными параметрами атмосферы, которые, на самом деле, не всегда известны на момент зарождения ТЦ. В дальнейшем были внесены элементы нелинейного моделирования [4, 5]. Выбором параметров обобщенной нелинейной модели можно управлять временной динамикой вихря, включая длительность стадий жизненного цикла ТЦ, максимальную скорость ветра и т.д. Использование мезомасштабных моделей ионосферы позволило значительно улучшить качество прогнозов динамики ТЦ [6, 7], в частности, изменения направления их траекторий в присутствии пространственной анизотропии температур. В последнее время большое внимание уделяется роли ионизации как на поверхности земли (естественная радиоактивность земли) [3, 8], так и на уровне тропопаузы (галактические космические лучи) [9].

Широкомасштабные эксперименты с использованием полетов самолетов-лабораторий внутрь ТЦ, космический мониторинг этих природных катастроф, а также теоретическое моделирование вводят понятие спиральности атмосферных движений и нелинейной теории обратного каскада (образование крупномасштабных структур из подобных структур

меньшего масштаба) в описание динамики развития ТЦ [3, 9]. В настоящей работе делается попытка представить проблемы динамики ТЦ с использованием результатов предыдущих исследований, а также оригинальных работ авторов по исследованию воздействия ТЦ на атмосферу и ионосферу Земли.

### **Классические теории описания тропических ураганов**

В работе [2] на основе данных экспериментальных наблюдений были обоснованы математические модели, пригодные для расчетов параметров временной динамики ТЦ. Эти модели основаны на использовании уравнения

$$dV/dt = \gamma \cdot (T - T_{\Pi}) \cdot V - \sigma \cdot V^2, \quad (1)$$

где  $T$  – температура поверхности океана в области ТЦ,

$T_{\Pi}$  - пороговое значение этой температуры, выше которой происходит усиление

возмущений;  $\sigma \cdot V^2$  – слагаемое, определяющее потери энергии, обусловленные

диссипативными процессами, возрастающими с ростом интенсивности вихря.

Обычно КПД преобразования тепловой энергии в движение воздуха в заданном направлении согласно [1] принимается равным  $\Delta p/p$ , где  $\Delta p$  – ускоряющий перепад давления, а  $p$  – полное давление на поверхности океана.

В работе [4] по аналогии с моделями генерации излучения в лазерах была предложена нелинейная модель развития ТЦ, учитывающая накачку энергии в системе океан-атмосфера, пороговые условия для формирования мощного вихря, а также его взаимодействие с окружающей средой.

В работе [5] проведено обобщение нелинейной модели [4], позволяющее описывать и стадию затухания ТЦ, связанную с выходом его на сушу или перемещением в область более холодной поверхности океана. Для этого в один из параметров окружающей среды, определяющий условия генерации вихря, вводилась зависимость от времени. Соответственно, понижение величины этого параметра ниже порогового значения приводит к затуханию ТЦ.

На Рис. 1 показано изменение скорости ветра в ТЦ с учетом затухания в соответствии с модифицированной нелинейной моделью [5].

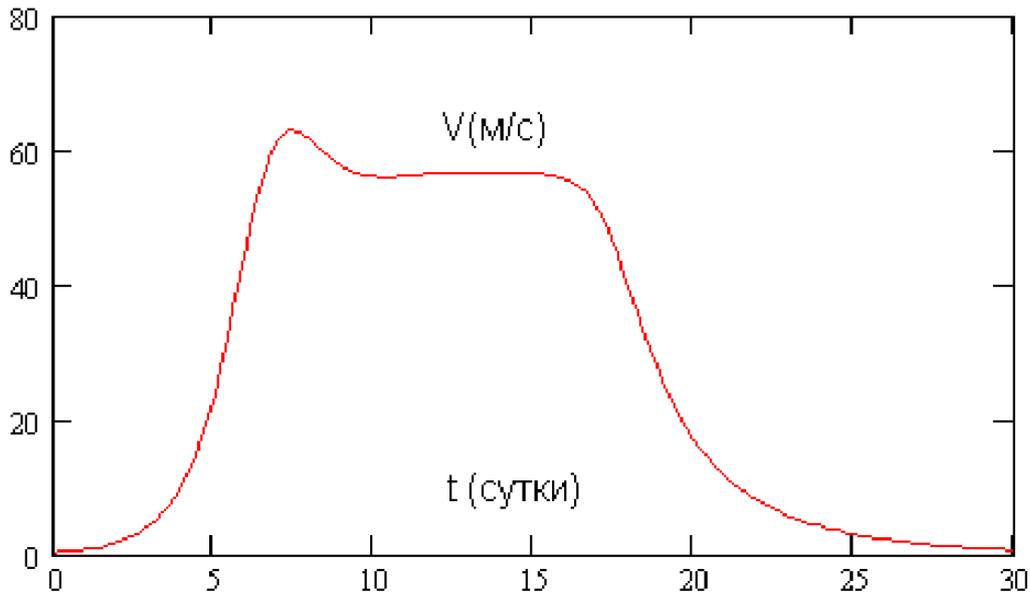


Рис. 1. Динамика изменения скорости ветра с учетом фазы затухания тропического циклона.

На Рис. 2 показано изменение температуры поверхности океана с учетом затухания в соответствии с модифицированной нелинейной моделью [5].

Как видно из приведенных рисунков, введение в модель свободных параметров (которые можно изменять) позволяет управлять ходом процесса образования и затухания ТЦ. В качестве свободных параметров можно вводить влияние солнечно-земных связей, роль которых статистически установлена в качестве одного из факторов регионального тропического циклогенеза.

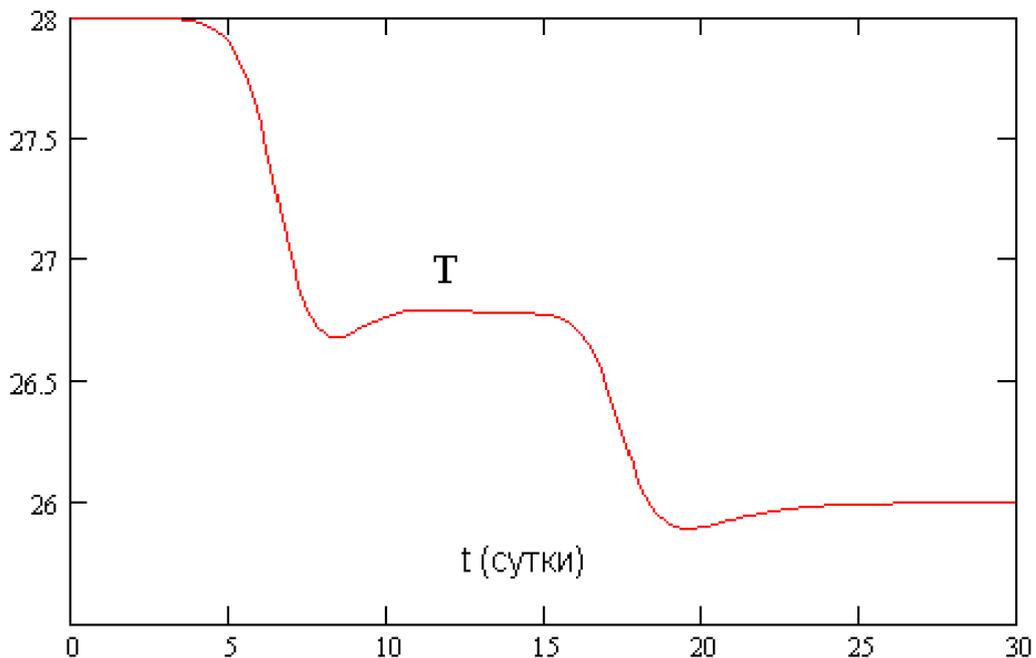


Рис. 2. Динамика температуры поверхности океана с учетом фазы затухания урагана.

### Использование мезомасштабных численных моделей атмосферы для моделирования тропических циклонов

Наиболее часто используемой в численных расчётах атмосферных процессов, в том числе тропических циклонов, является мезомасштабная модель NCAR 5 поколения MM5 [21]. Это ассимилятивная модель, позволяющая вводить в расчеты данные

экспериментальных наблюдений практически в реальном масштабе времени. Модель работает на площади  $3000 \times 4000 \text{ км}^2$  на десяти уровнях в диапазоне давлений от поверхности суши до уровня 50 гПа.

В последнее время успешно применяется методика, позволяющая рассчитывать динамику ТЦ в рамках модели MM5 путем введения малых конечных изменений параметров, в том числе и времени, называемая 4D-VAR [6]. С помощью этого подхода удалось определить наиболее чувствительные параметры, влияющие на динамику ТЦ.

В частности, в работе [7] с использованием результатов расчетов по модели MM5 продемонстрирована роль высокой температуры поверхности океана в Мексиканском залива в резком усилении интенсивности ТЦ Катрина в августе 2005 г. Пример применения модели MM5 приведен на Рис. 3.

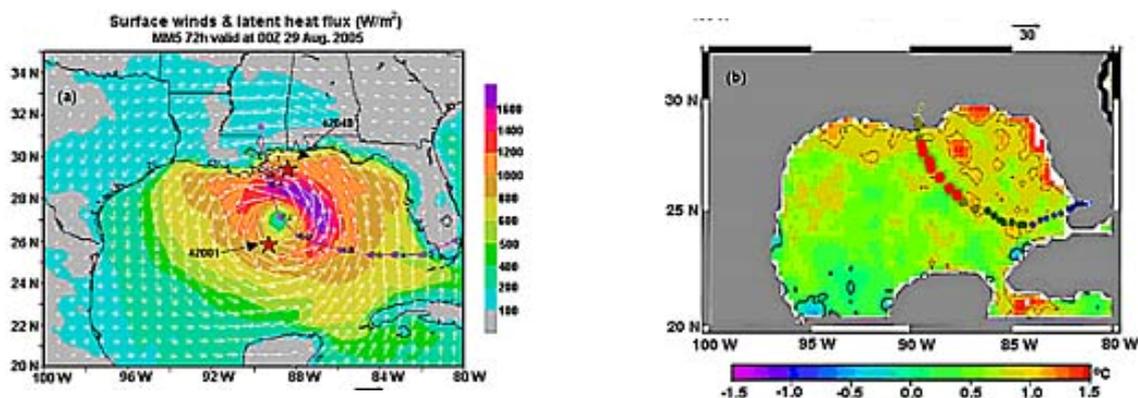


Рис. 3. Правая панель – скорость ветра на поверхности океана, рассчитанная по модели MM5 (белые стрелки), красными звездочками отмечено положение метеорологических буев; цветом показан поток скрытой теплоты испарения ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ). Левая панель – аномалия температуры поверхности океана вдоль траектории ТЦ Катрина в сравнении с 8-летним средним значением (1998-2005).

Результаты моделирования подтверждаются экспериментальными данными, полученными в работе [8].

### Моделирование тропических циклонов с учетом процессов ионизации

В работе [9] делается попытка обосновать необходимость определенного уровня ионизации для формирования достаточного количества центров конденсации. Из модельных расчетов, где в качестве исходного уравнения используется модифицированное уравнение Шулейкина [2], видно, что в обычных условиях при невысокой скорости ионизации в атмосфере, независимо от начальной скорости и температуры среды даже при высокой относительной влажности воздуха, развития мощного тропического циклона (максимальная скорость ветра свыше 60 м/с или 200 км/ч [2]) не происходит. Но при увеличении уровня ионизации происходит резкое усиление скорости ветра, также как и при увеличении поверхностной температуры (Рис. 4).

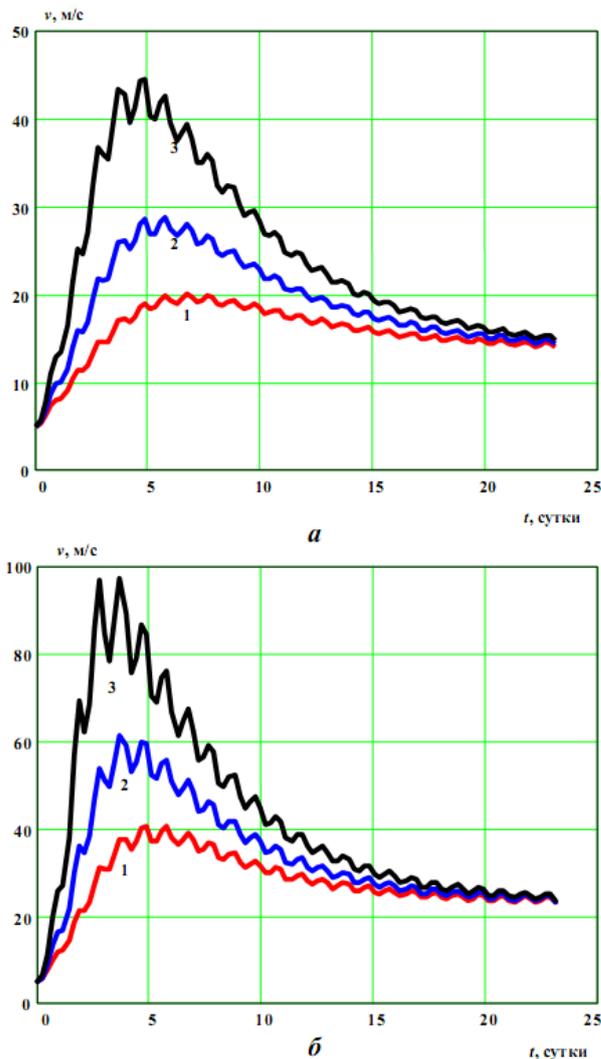


Рис. 4. Верхняя панель – скорость ветра в зависимости от времени при  $v_0=5$  м/с;  $H=95\%$ ;  $T_g=18^\circ\text{C}$ ; нижняя панель – скорость ветра при  $T_g=28^\circ\text{C}$  и максимальной скорости ионизации  $f_1: 1-26\text{ см}^{-3}\cdot\text{с}^{-1}$ ; 2 –  $52\text{ см}^{-3}\cdot\text{с}^{-1}$ ; 3 –  $104\text{ см}^{-3}\cdot\text{с}^{-1}$

В работе [10] описан физический механизм усиления ТЦ, связанный с изменением уровня ионизации на высоте тропопаузы во время кратковременного уменьшения потоков галактических космических лучей во время магнитной бури (Форбуш-понижение). Воздействие вариаций потоков космических лучей на интенсивность тропических циклонов в Атлантике установлено путем статистического анализа многолетнего ряда данных [12]. Механизм усиления ТЦ связан с уменьшением температуры на уровне тропопаузы, вызванным уменьшением выделения скрытой теплоты испарения, и, соответственно, увеличением перепада температур между поверхностью океана и тропопаузой, приводящим к усилению вертикальной конвекции. На Рис. 5 показаны вариации атмосферных параметров во время магнитной бури в конце августа 2005 г., связанные с усилением ТЦ Катрина [3, 10].

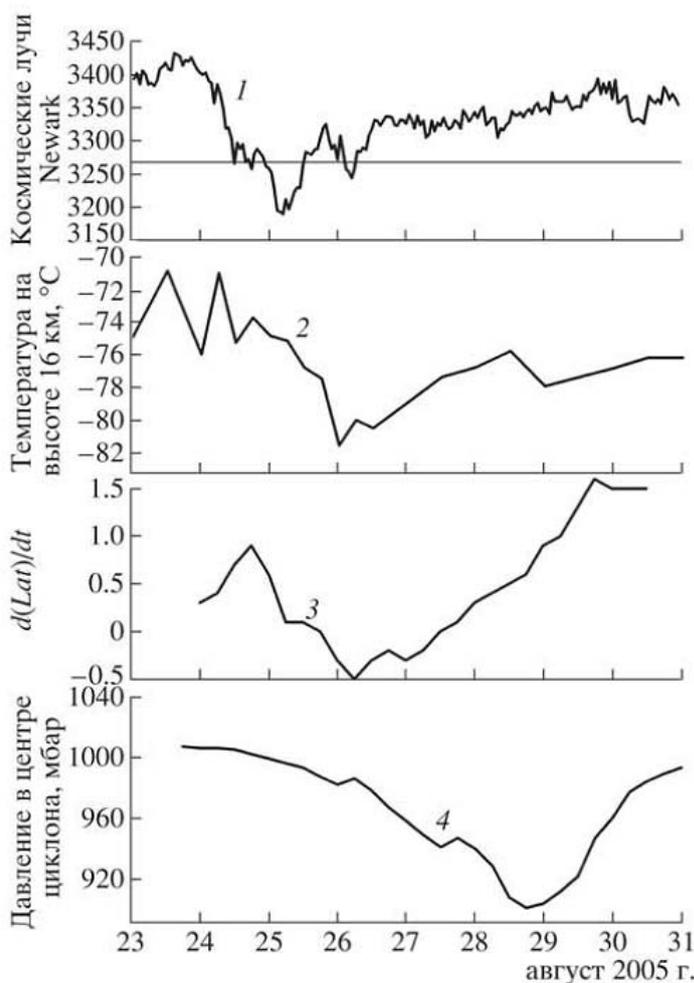


Рис. 5 Вариации потока галактических космических лучей по данным станции Newark, США – кривая 1, температура воздуха на высоте 16 км – кривая 2, производная географической широты положения урагана Катрина – кривая 3, давление в центре ТЦ Катрина – кривая 4.

Таким образом, установлено, что при моделировании динамики ТЦ необходимо учитывать уровень ионизации как вблизи поверхности океана, так и в верхней части урагана, поскольку термодинамические процессы, связанные с ионизацией, оказывают существенное воздействие на его энергетику.

### Спиральная природа тропического циклогенеза

В последнее время активно развивается направление исследования роли спиральности в тропическом циклогенезе. Проводятся теоретические и численные исследования перестройки крупномасштабной конвективной неустойчивости под действием мелкомасштабной спиральной турбулентности. Такая неустойчивость в нелинейной физике называется неустойчивостью обратного каскада. Неустойчивость развивается путем слияния мелкомасштабных спиральных конвективных структур и приводит к образованию более крупных и интенсивных спиральных вихрей.

При исследовании ТЦ до недавнего времени не обращали особого внимания на спиральные свойства поля скоростей. В последнее время все большее число ученых склоняется к тому, что глубокая кучево-дождевая конвекция с характерным масштабом 2–20 км по горизонтали, осуществляющая перенос явного и скрытого тепла от подстилающей поверхности вдоль всей высоты тропосферы в тропиках, является основным механизмом усиления предшествующей зародлению циклонической мезомасштабной (~200 км) циркуляции в вихрь ураганной силы [12]. Однако в настоящее время еще нет единого мнения по поводу сценария такой трансформации и участвующих в ней физических механизмов.

В работе [13] описаны численные эксперименты по оценки роли спиральности в развитии тропических циклонов, поставленные на базе модели университета Колорадо (США) RAMS (Regional Atmospheric Modeling System). Показано, что при развитии урагана нарушается симметрия спиральности (левая и правая спиральность). При влиянии мелкомасштабных вихрей в течение первых 15-17 часов модельного времени интегральная спиральность равна нулю. После приблизительно 18 ч модельного времени спиральность становится существенно положительной и нарастающей. При этом анализ полей вертикальной скорости и завихренности показывает, что положительная спиральность обусловлена преобладанием локальных восходящих циклонических движений. Ненулевая спиральность означает нарушение зеркальной симметрии атмосферной турбулентности и возможность возникновения крупномасштабной вихревой неустойчивости. Основным результатом работы можно считать то, что мониторинг спиральности (в том числе с борта космических аппаратов) может стать надежным индикатором развития тропических циклонов.

### Природа тепловых башен и электромагнитные свойства ураганов

В работе [13] отмечается, что основную роль в слиянии конвективных вихрей играют вихревые столбы, поднимающиеся через всю высоту тропосферы, которые были названы вихревыми горячими башнями. В частности, такие башни были обнаружены с помощью спутникового мониторинга (спутник TRMM, США) в урагане Катрина [14]. На Рис. 6 показан пример таких башен [14].

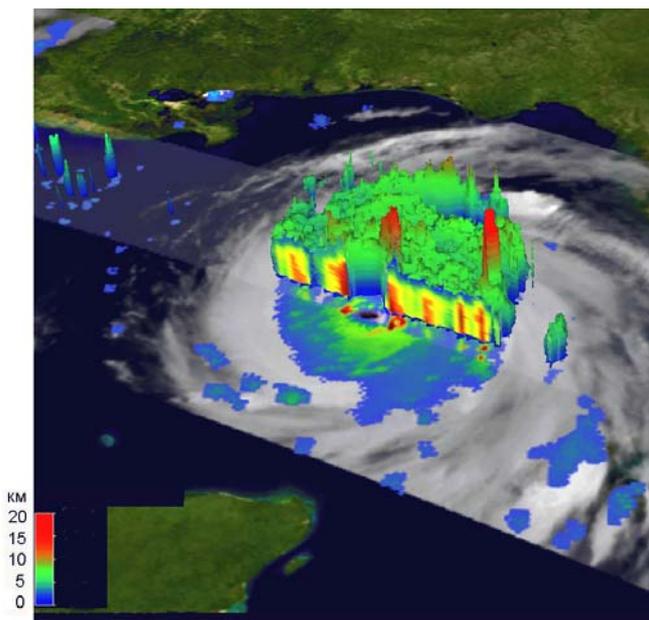


Рис. 6 Вертикальные структуры, отмеченные красным цветом – тепловые башни, зарегистрированные с помощью спутника TRMM в урагане Катрина [14]

Возникает вопрос о природе образования таких башен, и чем они отличаются от остальной части урагана, не структурированного в виде башен. То, что их температура выше, чем у окружающей среды, наводит на мысль о некоем механизме тепловыделения внутри башни, отличном от термодинамики всего ТЦ. Наиболее подходящим механизмом, на наш взгляд, является выделение скрытой теплоты испарения при конденсации влаги на ионах, описанный в [10, 15].

Как было отмечено выше, процессы ионизации играют важную роль в развитии ТЦ. Упомянулись два источника ионизации: природная радиоактивность Земли и галактические космические лучи. На наш взгляд следует принять во внимание еще один источник – грозовую активность. Как известно, ТЦ образуются из областей пониженного давления, где

развиваются грозы, способные производить интенсивную ионизацию с помощью молниевых разрядов. Интересно отметить, что как раз тепловые башни отмечаются повышенной грозовой активностью.

В связи с этим, мы можем предложить гипотезу о природе тепловых башен: это области повышенным содержанием ионов и повышенной грозовой активностью. Высокая скорость ионообразования приводит к повышенному выделению скрытой теплоты испарения за счет конденсации влаги на ионах и к повышенной температуре башни по сравнению с окружающей ее средой.

Следует обратить внимание еще на одно обстоятельство. Повышенное содержание ионов в этих образованиях требует учета электромагнитных сил, в частности, силы Лоренца. Учитывая, что вблизи геомагнитного экватора и в низких широтах силовые линии геомагнитного поля практически горизонтальны и направлены вдоль меридиана, то горизонтальные ветры, вовлекая в движения заряженные кластеры, приводят к их движению в вертикальном направлении (и к разделению зарядов, формированию слоистой электрической структуры облаков). Вертикальные движения, связанные с конвекцией, приводят к горизонтальным движениям ионов. Таким образом, электромагнитные силы приводят к нарушению спиральности, обусловленной гидродинамическими движениями, и вполне возможно, вносят свой вклад в нарушение нулевой интегральной спиральности в ходе развития урагана.

## **ВОЗДЕЙСТВИЕ УРАГАНОВ НА ИОНОСФЕРУ**

Наиболее очевидной причиной воздействия ТЦ на ионосферу Земли является проникновение электрического поля с верхней части урагана, напряженность которого составляет порядка 10 кВ/м. Проникновение электрического поля в ионосферу от грозового облака оценивалось многими авторами, но наиболее адекватным расчетом нам представляется работа [16]. Авторы этой работы рассматривают формирование области пониженной концентрации электронов в E-области ионосферы. Дальнейшее развитие работ по проникновению электрического поля в ионосферу [17] показало, что под воздействием сильного электрического поля, проникающего с поверхности земли (или грозового облака) в области E могут формироваться спорадические слои. Экспериментальные измерения с помощью вертикального зондирования позволили обнаружить одновременно с формированием спорадических слоев в области E понижение электронной концентрации в области F ионосферы [18].

На Рис. 7 представлены эффекты в ионосфере, зарегистрированные на Тайване при прохождении грозового фронта над ионосферной станцией. Грозовые облака регистрировались с помощью радара (горизонтальная линия на верхней панели Рис. 7), а крестиками на той же панели отмечены результаты детектора молниевых разрядов.

Интенсивные электрические поля над тропическими ураганами регистрировались с борта спутника Космос 1809 [19]. Их величина соответствовала полям, регистрируемым во время сильной геомагнитной бури ( $\sim 8$  мВ/м).

Наиболее подробно воздействие ТЦ на ионосферу было исследовано в работе [20] на примере урагана Катрина. Для этого были использованы данные приемников GPS в регионе прохождения ТЦ, а специальная технология позволила определить распределение электронной концентрации и положение высоты максимума слоя F ионосферы, а также модификацию вертикальных профилей электронной концентрации.

Трехмерное представление положения высоты максимума электронной концентрации слоя F2 ионосферы над зоной прохождения ТЦ Катрина для 28 августа 2005 г. показано на Рис. 8 [20].

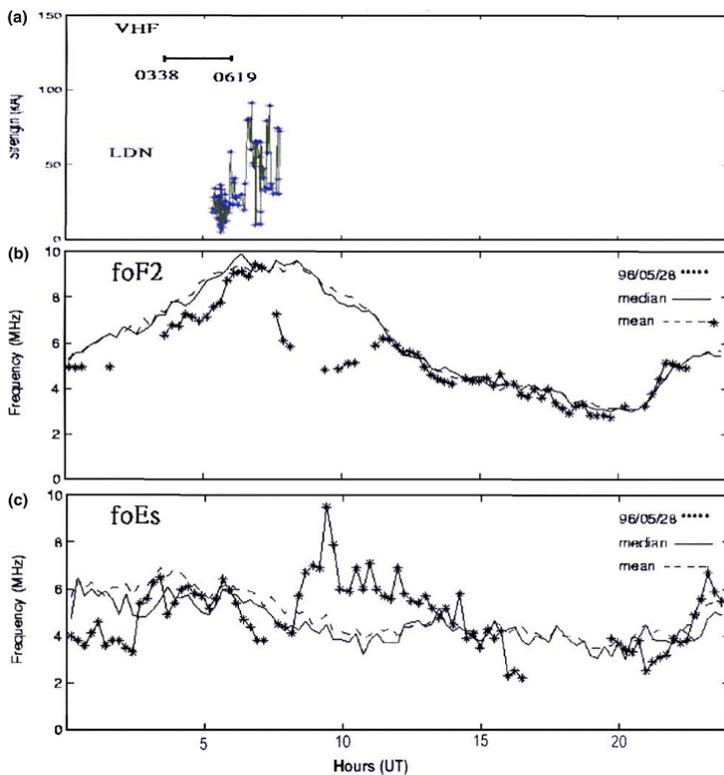


Рис. 7 Верхняя панель: горизонтальная линия – период времени, когда с помощью локатора наблюдались отражения от грозных облаков; крестики – грозные разряды, зарегистрированные с помощью датчика грозовой активности. Средняя панель – вариации критической частоты foF2. Сплошная линия – месячная медиана, крестики – данные во время прохождения грозы. Нижняя панель – вариации критической частоты спорадического слоя foEs. Сплошная линия – месячная медиана, крестики – данные во время прохождения грозы.

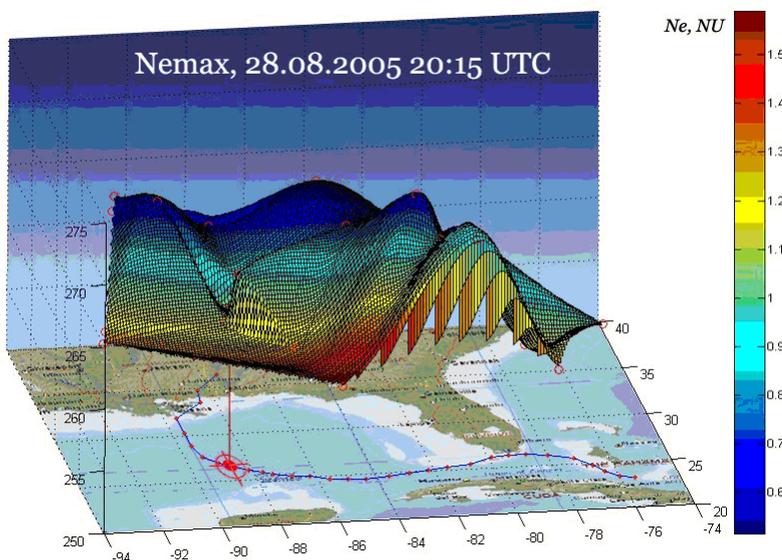


Рис. 8 Трехмерное представление положения высоты максимума электронной концентрации  $H_mF2$  в слое  $F2$  над зоной прохождения ТЦ Катрина для 28 августа 2005 г. (интервал времени 20:00 – 20:30 UT). Цветная шкала справа – электронная концентрация  $N_e$  ( $\times 10^6 \text{ см}^{-3}$ ).

Исследования воздействия ураганов на ионосферу и анализ их результатов является доказательством наличия связей между тропосферой и ионосферой Земли и существования сложных электромагнитных процессов в крупномасштабных вихревых структурах. Опускание ионосферы над ураганом, обнаруженное в работе [19] является как бы визуальным подтверждением наличия такой связи, полученный в работе [20] (Рис. 8).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенного анализа проблемы взаимодействия тропических циклонов с атмосферой и ионосферой Земли, показано, что при моделировании этих явлений необходимо учитывать спиральную природу циклогенеза. При этом следует принимать во внимание электромагнитные свойства этих структур, обуславливаемые процессами ионизации от различных источников: на подстилающей поверхности (природная радиоактивность), извне (космические лучи) и внутри самого урагана (грозовая активность). Электромагнитные силы внутри тропического циклона могут повлиять на его динамику, в частности, на развитие неустойчивости обратного каскада. Результатом ионизации становится повышенное тепловыделение в областях интенсивного ионообразования, что, по-видимому, и является причиной формирования тепловых башен внутри урагана с высокой грозовой активностью.

Эффективное разделение зарядов внутри вихревой структуры приводит к формированию сильного электрического поля на верхней кромке урагана, проникающего в ионосферу и создающего локальные неоднородности как в области E, так и в области F ионосферы. Источником ионосферных аномалий может также служить разница проводимости тропосферы внутри тропического циклона и вне его, что приводит к изменению потенциала ионосферы над ним.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голицын Г.С. Введение в динамику планетных атмосфер. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 104 с.
2. Шулейкин В.В. Расчет развития, движения и затухания тропических ураганов и главных волн, создаваемых ураганами. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 94 с.
3. Бондур В.Г., Крапивин В.Ф., Савиных В.П. Мониторинг и прогнозирование природных катастроф. // М.: Научный мир. 2009. 692 с.
4. Ярошевич М.И., Ингель Л.Х. Тропический циклон как элемент системы океан-атмосфера. // Доклады академии наук, Геофизика. 2000. Т. 399. С. 397-400.
5. Ерохин Н.С., Михайловская Л.А., Ерохин Н.Н. Нелинейная модель описания временной динамики полного жизненного цикла тропического урагана // Моделирование физических процессов в окружающей среде: Научная сессия МИФИ: М. МИФИ, 2007. Т. 5, С. 71-72.
6. Hoffman R. N., Henderson J. M., Leidner S. M. Using 4d- VAR to move a simulated tropical cyclone in a mesoscale model. // Computers and Mathematics with Applications. 2006. V. 52 P. 1193-1204.
7. Kafatos M., Sun D., Gautam R., Boybeyi Z., Yang R., Cervone G. Role of anomalous warm gulf waters in the intensification of Hurricane Katrina // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. L17802. doi:10.1029/2006GL026623.
8. Бондур В.Г., Васякин С.А. Космический мониторинг мезомасштабных вихревых процессов на границе атмосферы и океана. //Материалы Четвертой международной конференции “Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках”, Москва, 18-20 октября 2011 г.
9. Карелин А. В. О возможности космического мониторинга процессов возникновения тропических ураганов // Вопросы электромеханики. 2009. Т. 111, С. 43-50.
10. 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, Геофизика. 2008. Т. 422, С. 244-249.

11. Pérez-Peraza J., Kavlakov S., Velasco V., Gallegos-Cruz A., Azpra-Romero E., Delgado-Delgado O., Villicaña-Cruz F. Solar, geomagnetic and cosmic ray intensity changes, preceding the cyclone appearances around Mexico // *Advances in Space Research*. 2008. V. 42, P. 1601-1613.
12. Emanuel, K. 2003: Tropical cyclones. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 31, P. 75-104
13. Левина Г. В., Монтгомери М. Т. О первом исследовании спиральной природы тропического циклогенеза // *Доклады академии наук, Геофизика*. 2010. Т. 434, С. 1-6.
14. Young K. 2005. Satellites spot “hot towers” in Hurricane Katrina. // *New Scientist*. <http://space.newscientist.com/article/dn7929>
15. Pulinets S. A., Ouzounov D., Karelin A.V., Boyarchuk K. A., Pokhmelnikh L. A. 2006. The physical nature of the thermal anomalies observed before strong earthquakes // *Physics and Chemistry of the Earth*. V. 31. P. 143-153.
16. Hegai V.V., Kim V.P., Illich-Svitych P.V. 1990. The formation of a cavity in the night-time midlatitude ionospheric E-region above a thundercloud // *Planet. Space Sci.* V. 38. P. 703-707.
17. Пулинец С.А., Хегай В.В., Боярчук К.А., Ломоносов А.М. 1998. Атмосферное электрическое поле как источник изменчивости ионосферы // *Успехи физических наук*. Т. 41. С. 515–522.
18. Pulinets S. A., Liu J. Y. 2004. Ionospheric variability unrelated to solar and geomagnetic activity // *Adv. Space Res.*, V. 34, P.1926-1933.
19. Исаев Н. В., Сорокин В. М., Чмырев В. М., Серебрякова О. Н. 2002. Электрические поля в ионосфере, связанные с морскими штормами и тайфунами // *Геомагнетизм и аэрномия*. Т. 42. С. 670-675.
20. Бондур В. Г., Пулинец С. А., Узунов Д. Воздействие крупномасштабных атмосферных вихревых процессов на ионосферу на примере урагана Катрина // *Исследования Земли из космоса*. 2008. № 6, С. 3-11.
21. Grell G.A., Dudhia J., Stauffer D.R. A description of the fifth-generation PennState/NCAR mesoscale model (MM5). 1994: Tech. Note 3981A, NCAR, 122pp.