

---

---

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА**

---

---

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

© 2012 г. В. Г. Бондур\*, С. А. Пулинец

*ГУ Научный центр аэрокосмического мониторинга "Аэрокосмос" Минобрнауки России и РАН, Москва*

\*E-mail: vgbondur@aerocosmos.info

Поступила в редакцию 03.02.2012 г.

Рассматриваются механизмы зарождения и интенсификации таких опасных атмосферных вихревых явлений, как тропические циклоны (ТЦ), а также процессы их электромагнитного взаимодействия с ионосферой Земли. Приведен анализ различных моделей ТЦ, в том числе принимающих во внимание процессы ионизации. Проанализированы механизмы, учитывающие 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 усилением ТЦ. Показано, что такого рода 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 увеличению разницы температур между поверхностью океана и верхней частью тропического циклона, и, соответственно, к увеличению вертикальной конвекции, что приводит к интенсификации циклона. Делается вывод о том, что при исследовании таких мезомасштабных вихревых процессов в атмосфере, как ТЦ, следует учитывать не только гидродинамические особенности, но также термодинамические и электромагнитные свойства этих структур. Полученные результаты важны для организации исследований и мониторинга ТЦ, в том числе космическими методами.

**Ключевые слова:** мезомасштабные атмосферные процессы, тропические циклоны, вихревые образования, атмосфера, ионосфера, космический мониторинг

### ВВЕДЕНИЕ

Теория зарождения и развития тропических циклонов (ТЦ) формировалась вначале в рамках классической гидродинамики и термодинамики атмосферы (Голицын, 1973; Шулейкин, 1978). При этом моделирование осуществлялось с использованием заданных начальных параметров атмосферы, которые, на самом деле, не всегда известны на момент зарождения ТЦ. В дальнейшем были внесены элементы нелинейного моделирования (Ярошевич, Ингель, 2000; Ерохин и др., 2007). При этом путем выбора параметров обобщенной нелинейной модели появилась возможность анализировать временную динамику вихря, включая длительность стадий жизненного цикла ТЦ, максимальную скорость ветра и т.д. Использование мезомасштабных моделей атмосферы позволило значительно улучшить качество прогнозов динамики ТЦ (Hoffman et al., 2006; Kafatos et al., 2006) и, в частности, изменения направления их движений в присутствии пространственной анизотропии поля температур. В последнее время большое внимание уделяется роли ионизации как на поверхности Зем-

ли (естественная радиоактивность Земли) (Карелин, 2009; Бондур и др., 2009), так и на уровне тропопаузы (галактические космические лучи) (Бондур и др., 2008а; 2009).

Результаты экспериментальных исследований, полученных при полетах самолетов-лабораторий внутрь ТЦ, в процессе космического мониторинга этих природных катастроф, а также в результате моделирования, позволили ввести понятие спиральности атмосферных движений и развить нелинейную теорию обратного каскада (образование крупномасштабных структур из структур меньшего масштаба) для описания динамики развития этих опасных природных явлений (Левина, Монтомери, 2010).

В настоящей работе делается попытка представить проблемы динамики ТЦ на основании результатов предыдущих исследований, а также работ авторов по исследованию воздействия ТЦ на атмосферу и ионосферу Земли с использованием космических данных (Бондур и др., 2008а, б; 2009; Бондур, Васякин, 2011; 2012; Пулинец и др. 1998; Pulinets, Liu, 2004; Pulinets et al., 2006).

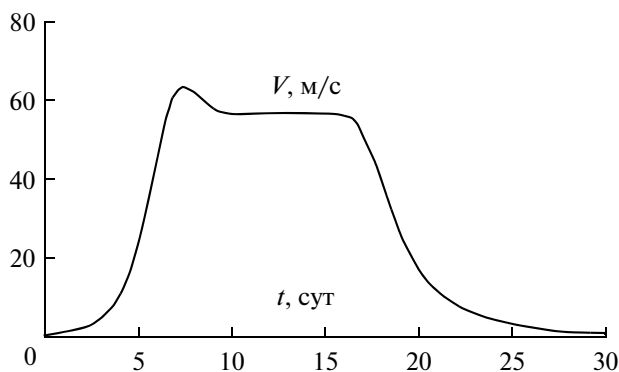


Рис. 1. Динамика изменения скорости ветра с учетом фазы затухания ТЦ.

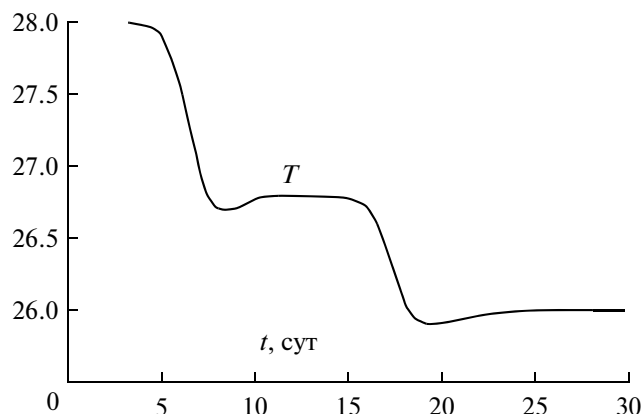


Рис. 2. Динамика температуры поверхности океана с учетом фазы затухания урагана.

### КЛАССИЧЕСКИЕ ТЕОРИИ ОПИСАНИЯ ТРОПИЧЕСКИХ УРАГАНОВ

В ранних работах (см. например (Шулейкин, 1978)), на основе результатов экспериментальных наблюдений были созданы математические модели, пригодные для расчетов параметров временной динамики ТЦ. Эти модели основаны на использовании уравнения

$$dV/dt = (T - T_{п})V - \sigma V^2,$$

где  $T$  – температура поверхности океана в области ТЦ;  $T_{п}$  – пороговое значение этой температуры, выше которой происходит усиление возмущений;  $\sigma V^2$  – слагаемое, определяющее потери энергии, обусловленные диссипативными процессами, возрастающими с ростом интенсивности вихря.

Обычно КПД преобразования тепловой энергии в энергию движения воздуха в заданном направлении принимается равным (Голицын, 1973)

$$\Delta p/p,$$

где  $\Delta p$  – ускоряющий перепад давления,  $p$  – полное давление на поверхности океана.

В работе (Ярошевич, Ингель, 2000) 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 (Ерохин и др., 2007) развита нелинейная модель (Ярошевич, Ингель, 2000), позволяющая 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 от порогового значения приводило к затуханию ТЦ.

На рис. 1 показано изменение скорости ветра в ТЦ, а на рис. 2 – изменение температуры поверхности океана с учетом затухания в соответствии с модифицированной нелинейной моделью (Ерохин и др., 2007). Как видно из приведенных рисунков, введение в модель свободных параметров (которые можно изменять) позволяет управлять описанием 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 (Pérez-Peraza et al., 2008).

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕЗОМАСШТАБНЫХ ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ АТМОСФЕРЫ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ

В численных расчетах атмосферных процессов, в том числе ТЦ, наиболее часто используется мезомасштабная модель NCAR пятого поколения MM5 (Grell et al., 1994). Это ассимилятивная модель, позволяющая вводить в расчеты данные экспериментальных наблюдений практически в реальном масштабе времени. Модель работает на площади  $3000 \times 4000$  км<sup>2</sup> на десяти уровнях в диапазоне давлений от давления на 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 (Hoffman et al., 2006). С помощью этого подхода удалось определить наиболее чувствительные параметры, влияющие на динамику ТЦ. В частности, в работе (Kafatos et al., 2006) с использованием результатов расчетов по модели MM5 продемонстрирована роль высокой температуры поверхности океана в Мекси-

канском заливе в резком усилении интенсивности урагана Katrina в августе 2005 г. Результаты моделирования подтверждаются экспериментальными данными, полученными в работах (Бондур, Васякин, 2011; 2012) на основании анализа спутниковой информации.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ С УЧЕТОМ ПРОЦЕССОВ ИОНИЗАЦИИ

В работе (Карелин, 2009) делается попытка обосновать необходимость наличия определенного уровня ионизации для формирования достаточного количества центров конденсации. Модельные расчеты, в которых в качестве исходного уравнения использовалось модифицированное уравнение Шулейкина (Шулейкин, 1978), показали, что в обычных условиях при невысокой скорости ионизации в атмосфере, независимо от начальной скорости и температуры среды даже при высокой относительной влажности воздуха, не происходит развития мощного ТЦ, в котором максимальная скорость ветра превышает 60 м/с или 200 км/ч (Шулейкин, 1978). Но при увеличении уровня ионизации происходит резкое усиление скорости ветра, также как и при увеличении поверхностной температуры (см. рис. 3). Это свидетельствует о необходимости учета процессов ионизации пограничного слоя атмосферы при моделировании зарождения и развития ТЦ.

Роль ионизации существенна и на больших высотах, вблизи верхней кромки облаков. В работе (Бондур и др., 2008а) описан физический механизм усиления ТЦ, связанный с изменением уровня ионизации на высоте тропопаузы во время кратковременного уменьшения потоков галактических космических лучей при развитии магнитной бури (Форбуш-понижение). Воздействие вариаций потоков космических лучей на интенсивность ТЦ в Атлантике установлено путем статистического анализа многолетнего ряда данных (Pérez-Peraza et al., 2008). 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. 4 показаны вариации атмосферных параметров во время магнитной бури, происшедшей в конце августа 2005 г., которая привела к усилению урагана Katrina (Бондур и др., 2008а; 2009).

Таким образом, установлено, что при моделировании динамики ТЦ необходимо учитывать уровень ионизации как вблизи поверхности океана, так и в верхней части урагана, поскольку термо-

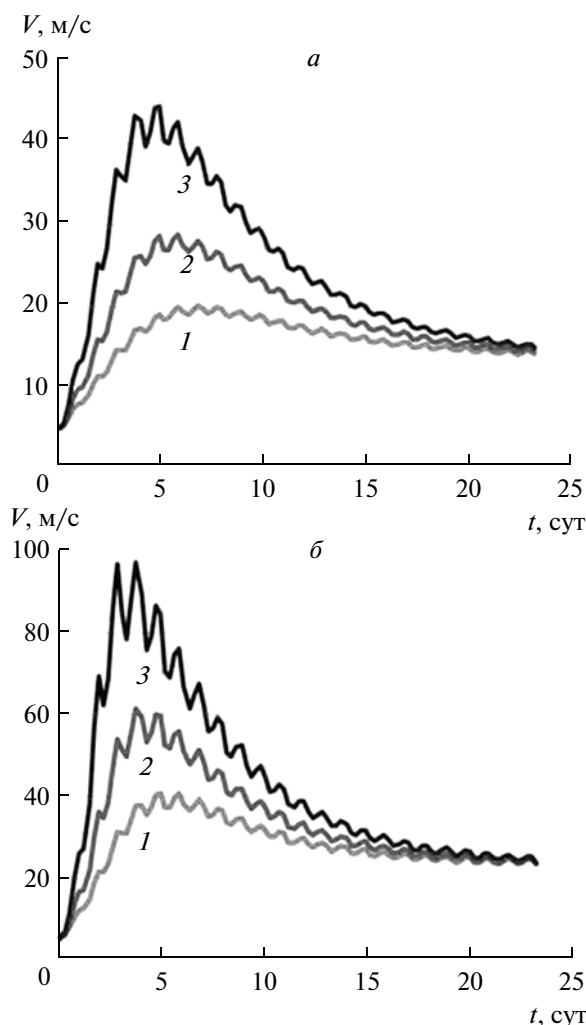
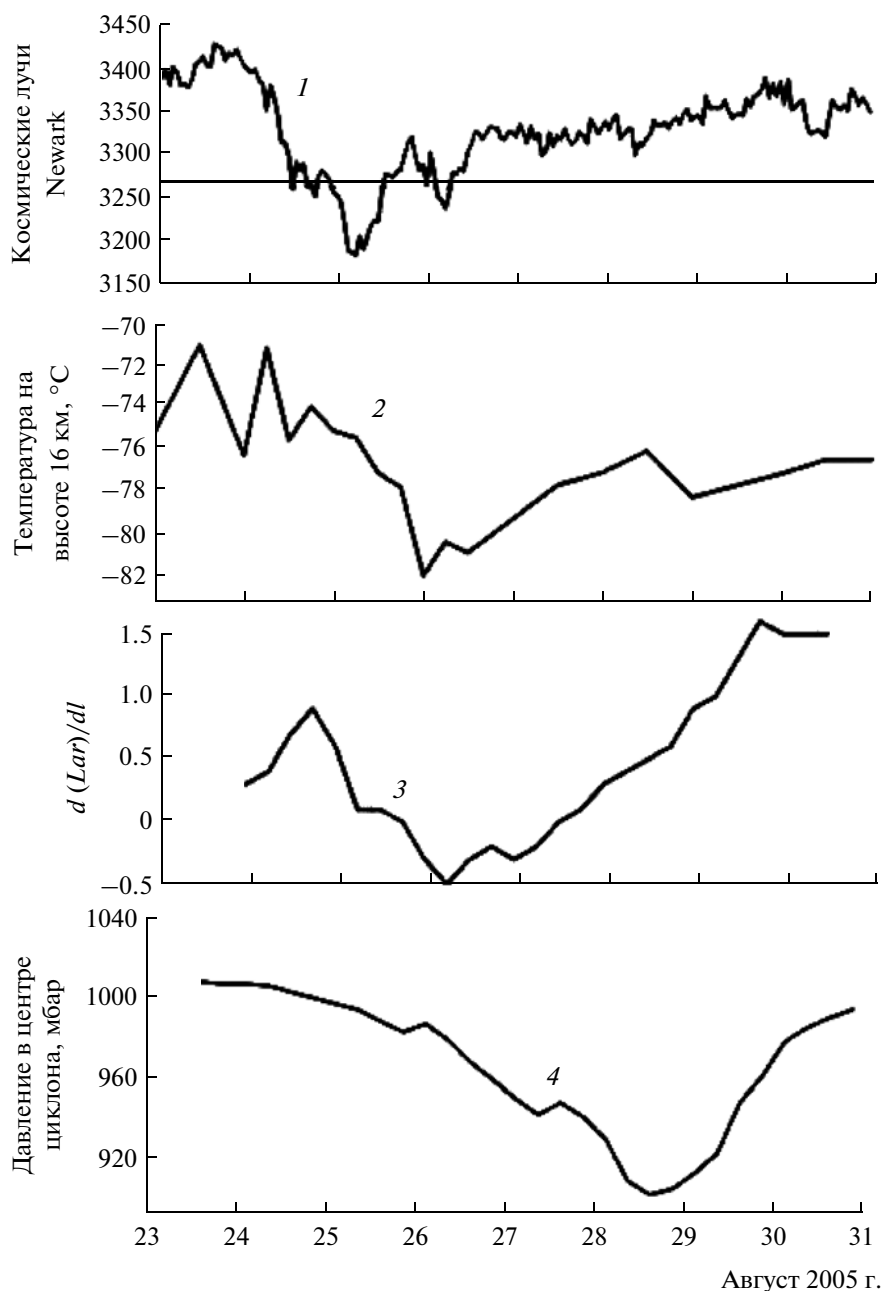


Рис. 3. *a* – Скорость ветра в зависимости от времени при  $V_0 = 5$  м/с,  $H = 95\%$ ,  $T_g = 18^\circ\text{C}$ ; *б* – скорость ветра при  $T_g = 28^\circ\text{C}$  и макс. скорости ионизации  $f1$ : 1 –  $26 \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$ ; 2 –  $52 \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$ ; 3 –  $104 \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$ .

динамические процессы, связанные с ионизацией, оказывают воздействие на его энергетику.

### СПИРАЛЬНОСТЬ В ТРОПИЧЕСКОМ ЦИКЛОГЕНЕЗЕ

В последнее время активно развивается научное направление, связанное с исследованием роли спиральности в тропическом циклогенезе. Проводятся 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 конвектив-



**Рис. 4.** 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 Katrina – кривая 3, давление в центре урагана Katrina – кривая 4.

ных 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 исследователей склоняется к тому, что глубокая кучево-дождевая конвекция в тропиках с характерным масштабом 2–20 км по горизонтали, осуществляющая перенос явного и скрытого тепла от подстилающей поверхности вдоль всей

высоты тропосферы, является основным механизмом усиления, предшествующим зарождению циклонической мезомасштабной (~200 км) циркуляции и перехода ее в вихрь ураганной силы (Emanuel, 2003). Однако в настоящее время еще нет единого мнения по поводу сценария такой трансформации и участвующих в ней физических механизмов.

В работе (Левина, Монтгомери, 2010) описаны численные эксперименты по оценке роли спи-

ральности в развитии ТЦ, выполненные на основе модели RAMS (Regional Atmospheric Modeling System) университета Колорадо (США). Показано, что при развитии урагана нарушается симметрия спиральности (левая и правая спиральность). При влиянии мелкомасштабных вихрей в течение первых 15–17 ч 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 обесценивает 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 ТЦ.

#### ПРИРОДА ТЕПЛОВЫХ БАШЕН И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА УРАГАНОВ

В работе (Левина, Монтгомери, 2010) отмечается, что основную роль в слиянии конвективных вихрей в ТЦ играют вихревые столбы, поднимающиеся через всю толщу тропосферы, которые были названы вихревыми горячими башнями. В частности, такие башни были обнаружены из космоса (спутник TRMM, США) в урагане Katrina, пример показан на рис. 5 (Young, 2005) (см. на цветн. вклейках).

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 температура окружающей среды, наводит на мысль о некоем механизме тепловыделения внутри башни, отличном от термодинамики всего ТЦ. Одним из подходящих механизмов, на наш взгляд, может являться выделение скрытой теплоты испарения при конденсации влаги на ионах, описанных в работах (Бондур и др., 2008б; Pulinets et al., 2006).

Как было отмечено выше, процессы ионизации играют важную роль в развитии ТЦ. Упомянулись два источника ионизации: природная радиоактивность Земли и галактические космические лучи. Следует принять во внимание еще один источник ионов – грозовую активность. Как известно, ТЦ образуются из областей пониженного давления, где развиваются грозы, способные вызывать интенсивную ионизацию с помощью молниевых разрядов. Интересно отметить, что

как раз области с тепловыми башнями отличаются повышенной грозовой активностью.

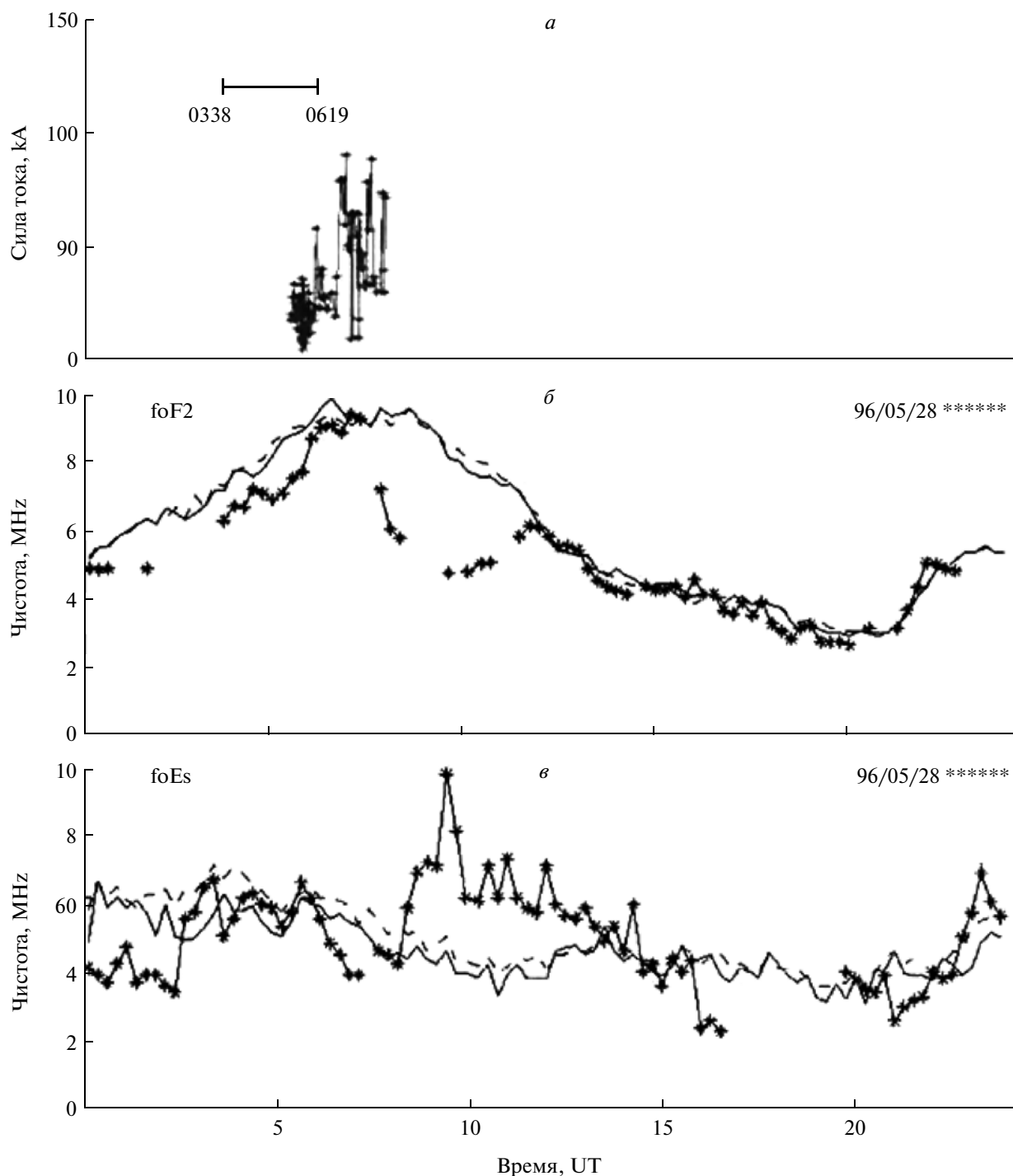
В последнее время предлагаются также другие механизмы ионизации, связанные с развитием коронного разряда на каплях воды (Карелин, 2010) и развитием лавинного процесса, приводящего к пробое (при возможном участии космических лучей как триггерного механизма) (Гуревич и др., 2009).

В связи с этим можно предложить следующую гипотезу о природе тепловых башен – это области с 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.

При этом следует обратить внимание еще на одно обстоятельство: повышенное содержание ионов в этих образованиях требует учета электромагнитных сил, в частности, силы Лоренца. С учетом того, 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. Это вызывает разделение зарядов и формирование слоистой электрической структуры облаков. Вертикальные движения, связанные с конвекцией, приводят к горизонтальным движениям ионов. Таким образом, электромагнитные силы способствуют нарушению спиральности, обусловленной гидродинамическими движениями, и, вполне возможно, вносят свой вклад в нарушение нулевой интегральной спиральности в ходе развития урагана.

#### ВОЗДЕЙСТВИЕ УРАГАНОВ НА ИОНОСФЕРУ

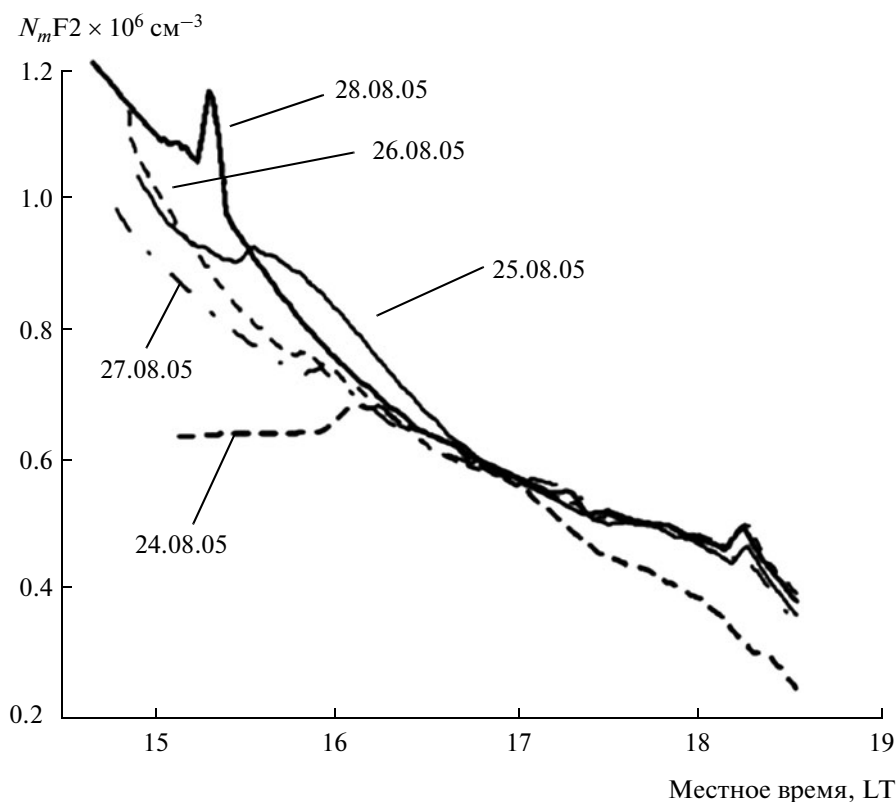
Наиболее очевидной причиной воздействия ТЦ на ионосферу Земли является проникновение электрического поля из верхней части урагана, напряженность которого составляет порядка 10 кВ/м. Проникновение электрического поля от грозового облака в ионосферу оценивалось многими авторами, например в работе (Negai et al., 1990). В этой работе рассматривается формирование зоны пониженной концентрации электронов в E-области ионосферы. Дальнейшие исследования проникновения электрического поля в ионосферу (Пулинец и др., 1998) показали, что под воздействием сильного электрического поля, проникающего с поверхности земли (или грозового облака), в E-области могут формироваться спорадические слои. Экспериментальные измерения с использованием метода вертикального зондиро-



**Рис. 6.** Эффекты в ионосфере, зарегистрированные на Тайване, при прохождении грозового фронта над ионосферной станцией: *a* – период времени, когда с помощью локатора наблюдались отражения от грозовых облаков (горизонтальная линия); грозовые разряды, зарегистрированные с помощью датчика грозовой активности (крестики); *b* – вариации критической частоты foF2 (сплошная линия – месячная медиана, крестики – данные во время прохождения грозы); *c* – вариации критической частоты спорадического слоя foEs (сплошная линия – месячная медиана, крестики – данные во время прохождения грозы).

вания позволили одновременно с формированием спорадических слоев в E-области обнаружить понижение электронной концентрации в F-области ионосферы (Pulinets, Liu, 2004).

На рис. 6 представлены эффекты в ионосфере, зарегистрированные на Тайване, при прохождении грозового фронта над ионосферной станцией. Грозовые облака регистрировались также с по-



**Рис. 8.** Вариации электронной концентрации  $N_mF2$  над ураганом Katrina по данным навигационного спутника GPS № 19 для периода 24–28 августа 2005 г. (Бондур и др., 2008б).

мощью радара (горизонтальная линия на рис. 6а), а результаты, зафиксированные с помощью детектора молниевых разрядов, показаны на данном рисунке крестиками.

Интенсивные электрические поля над тропическими ураганами регистрировались с борта спутника “Космос-1809” (Исаев и др., 2002). Их величина соответствовала полям, регистрируемым во время сильной геомагнитной бури (~8 мВ/м).

Воздействие ТЦ на ионосферу было исследовано в работе (Бондур и др., 2008б) на примере урагана Katrina. Для этого были использованы данные, полученные с помощью приемников спутниковой навигационной системы GPS в районе прохождения ТЦ, а применяемая специальная технология обработки позволила определить распределение электронной концентрации и положение высоты максимума F-слоя ионосферы, а также модификацию вертикальных профилей электронной концентрации.

Трехмерное представление положения высоты максимума электронной концентрации слоя F2 ионосферы над зоной прохождения ТЦ Katrina для 28.08.2005 г. показано на рис. 7 (Бондур и др., 2008б) (см. на цветн. вклейках). Понижение высоты максимума электронной ионизации слоя F2 ионосферы над ураганом Katrina сопровождалось

пикообразным увеличением электронной концентрации, показанном на рис. 8 (Бондур и др., 2008б).

Подобное увеличение электронной концентрации над ураганами регистрировалось также со спутника “Космос-1809” (Беляев и др., 2010). Авторы работы (Беляев и др., 2010) интерпретируют наблюдаемое повышение как результат выноса ионов вверх восходящим потоком нейтральной атмосферы над глазом урагана, увлекающим вследствие столкновений ионы вверх. При этом квазинейтральность плазмы поддерживается продольной подвижностью электронов вдоль магнитного поля. Тонкая структура пика в зените над ураганом указывает на то, что струя ионов останавливается на высоте ~1500 км.

Исследования воздействия ураганов на ионосферу и анализ их результатов являются доказательством наличия связей между тропосферой и ионосферой Земли и существования сложных электромагнитных процессов в крупномасштабных вихревых структурах. Опускание ионосферы над ураганом, обнаруженное в работе (Бондур и др., 2008б), и повышение электронной концентрации над глазом урагана являются подтверждением наличия такой связи.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенного анализа проблем генерации ТЦ и их взаимодействия с атмосферой Земли, показано, что при моделировании этих явлений необходимо учитывать спиралевидность 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, а также коронный разряд на каплях и пробой на убегающих электронах). Электромагнитные силы внутри ТЦ могут повлиять на его динамику, в частности, на развитие неустойчивости обратного каскада. Результатом ионизации становится повышенное тепловыделение в областях интенсивного ионообразования, что, по-видимому, 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 E-области, так и в F-области ионосферы. Источником ионосферных аномалий может служить также разница проводимости тропосферы внутри ТЦ и вне его, что приводит к изменению потенциала ионосферы над ним.

Работа выполнена при государственной поддержке ведущей научной школы НШ-374.2012.5 “Аэрокосмические исследования и мониторинг взаимодействия атмосферы и океана в интересах наук о Земле, экологии и рационального природопользования”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Беляев Г., Костин В., Трушкина Е., Овчаренко О., Бойчев Б. Вариации параметров ионосферы при формировании и развитии тайфунов // SES2010, 6-th Int. Sci. Conf.: Space, Ecology, Safety. 2–4 November 2010. Sofia, Bulgaria. P. 83–90.
- Бондур В.Г., Васякин С.А. Космический мониторинг мезомасштабных вихревых процессов на границе атмосферы и океана // Матер. 4-й Междунар. конф. “Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках”. Москва, 18–20 октября 2011 г.
- Бондур В.Г., Васякин С.А. Мониторинг Атлантической зоны тропического циклогенеза // Изв. ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка. № 1. 2012. С. 3–12.
- Бондур В.Г., Крапивин В.Ф., Савиных В.П. Мониторинг и прогнозирование природных катастроф. М.: Научный мир, 2009. 692 с.
- Бондур В.Г., Пулинец С.А., Ким Г.А. О роли вариаций галактических космических лучей в тропическом циклогенезе на примере урагана Katrina // Докл. РАН. 2008а. Т. 422. С. 244–249.
- Бондур В.Г., Пулинец С.А., Узунов Д. Воздействие крупномасштабных атмосферных вихревых процессов на ионосферу на примере урагана Katrina // Исслед. Земли из космоса. 2008б. № 6. С. 3–11.
- Голицын Г.С. Введение в динамику планетных атмосфер. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 104 с.
- Гуревич А.В., Караитин А.Н., Рябов В.А. Нелинейные явления в ионосферной плазме. Влияние космических лучей и пробоя на убегающих электронах на грозовые разряды // Усп. физич. наук. 2009. Т. 179. № 7. С. 779–790.
- 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.
- Исаев Н.В., Сорокин В.М., Чмырев В.М., Серебрякова О.Н. Электрические поля в ионосфере, связанные с морскими штормами и тайфунами // Геомагнетизм и аэронавигация. 2002. Т. 42. С. 670–675.
- Карелин А.В. О возможности космического мониторинга процессов возникновения тропических ураганов // Вопр. электромеханики. 2009. Т. 111. С. 43–50.
- Карелин А.В. Механизм генерации электричества в грозовых облаках и тропических ураганах // Вопр. электромеханики. 2010. Т. 118. С. 45–49.
- Левина Г.В., Монгомери М.Т. О первом исследовании спиральной природы тропического циклогенеза // Докл. РАН. Геофизика. 2010. Т. 434. С. 1–6.
- Пулинец С.А., Хегай В.В., Боярчук К.А., Ломоносов А.М. Атмосферное электрическое поле как источник изменчивости ионосферы // Усп. физич. наук. 1998. Т. 41. С. 515–522.
- Шулейкин В.В. Расчет развития, движения и затухания тропических ураганов и главных волн, создаваемых ураганами. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 94 с.
- Ярошевич М.И., Ингель Л.Х. Тропический циклон как элемент системы океан–атмосфера // Докл. РАН. Геофизика. 2000. Т. 399. С. 397–400.
- Emanuel K. 2003: Tropical cyclones // Ann. Rev. Earth Planet. Sci. V. 31. P. 75–104.
- Grell G.A., Dudhia J., Stauffer D.R. A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5). Tech. Note 3981A. NCAR, 1994. 122 p.
- 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.
- Hoffman R.N., Henderson J.M., Leidner S.M. Using 4D-VAR to move a simulated tropical cyclone in a mesoscale model // Comp. & Math. with Applicat. 2006. V. 52. P. 1193–1204.
- 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.
- 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 // *Adv. Space Res.* 2008. V. 42. P. 1601–1613.

*Pulinets S.A., Liu J.Y.* Ionospheric variability unrelated to solar and geomagnetic activity // *Adv. Space Res.* 2004. V. 34. P. 1926–1933.

*Pulinets S.A., Ouzounov D., Karelin A.V., Boyarchuk K.A., Pokhmelnikh L.A.* The physical nature of the thermal anomalies observed before strong earthquakes // *Phys. Chem. Earth.* 2006. V. 31. P. 143–153.

*Young K.* Satellites spot “hot towers” in Hurricane Katrina // *New Scientist.* 2005. <http://space.newscientist.com/article/dn7929>

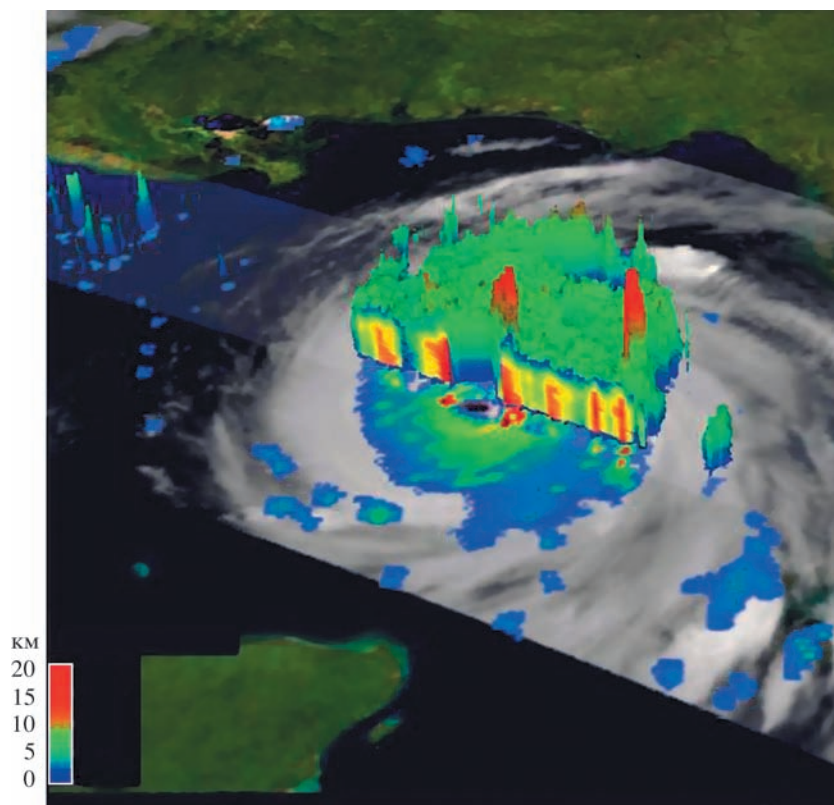
## The Mesoscale Atmospheric Vortical Structure Impact on the Upper Atmosphere and Ionosphere of the Earth

V. G. Bondur, S. A. Pulinets

*“AEROCOSMOS” Scientific Center for Aerospace Monitoring under the Ministry of Education and Sciences of the Russian Federation and the Russian Academy of Sciences, Moscow*

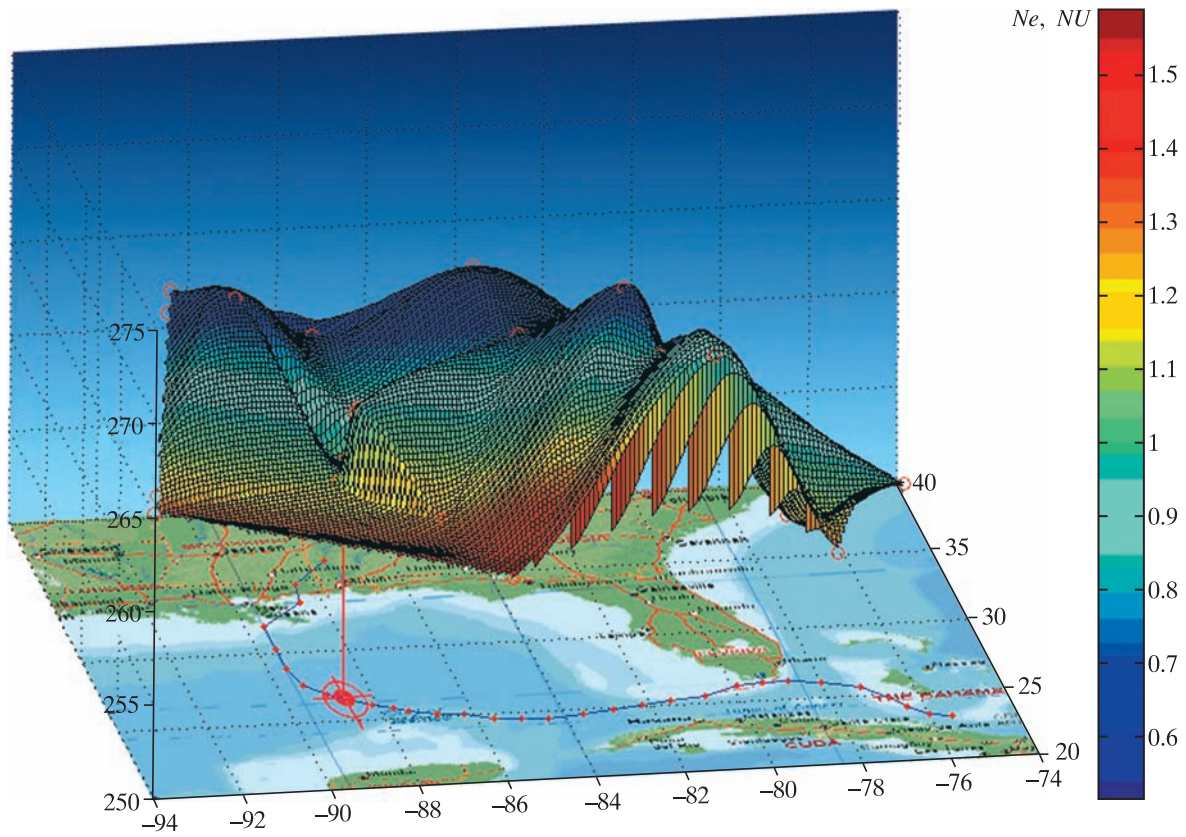
The mechanisms of incipience and intensification of dangerous atmospheric vortical processes such as tropical cyclones (TC), as well as their interaction with the Earth’s ionosphere are considered. The different models of TC are analyzed including the models taking into account the ionization processes. The mechanisms taking into account the spiral field of velocities during the TC formation have been analyzed, as well as the physical mechanism, explaining the established statistically relationship of short-term variations of galactic cosmic rays (Forbush-decreases) with the frequency of galactic TC incipience and amplification. It is demonstrated that such impact is conditioned by the drop of ion production rate during the Forbush decreases at the level of tropopause, and respectively decreasing of temperature at the top of ionosphere altitude because of decrease of latent heat release which is connected with water vapor condensation on the newly formed ions. This process leads to the rise of temperature difference between the ocean surface and the top level of tropical depression, and respectively to the amplification of vertical convection what has as a consequence the cyclone intensification. It is concluded that investigation of such mesoscale vortical processes requires taking into account not only the hydrodynamical features but the thermodynamical and electrodynamic of these formations as well. The results of discussion are important for organization of studies and monitoring of TC with the use of space born technologies.

**Keywords:** mesoscale atmospheric processes, tropical cyclones, vortical formations, ionosphere, ionosphere, space monitoring



**Рис. 5.** Вертикальные структуры, отмеченные красным цветом, – тепловые башни, зарегистрированные с помощью спутника TRMM в урагане Katrina (Young, 2005).





**Рис. 7.** Трехмерное представление положения высоты максимума электронной концентрации  $N_mF2$  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  $N_e$  ( $\times 10^6 \text{ см}^{-3}$ ).

