

## Особенности взаимодействия тропических циклонов Hondo и Ivan в поле интегрального водяного пара

Г.А. Ким<sup>1</sup>, Е.А. Шарков<sup>2</sup>, И.В. Покровская<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Научный центр аэрокосмического мониторинга «АЭРОКОСМОС»,  
105064 Москва, Гороховский пер., 4

E-mail: kim@isintech.ru

<sup>2</sup> Институт космических исследований РАН,  
Москва 117997, Профсоюзная ул., 84/32

E-mail: e.sharkov@mail.ru

В работе приведен детальный анализ энергетических особенностей тропического циклона Hondo (Южный Индийский океан, 02.02.2008–27.02.2008) и сильного тропического циклона Ivan (07.02.2008–18.02.2008) на основе метода «слияния» разномасштабных данных спутникового ИК и микроволнового дистанционного зондирования. Были использованы данные оптических каналов геостационарного ИСЗ Meteosat-7 и продукт восстановления интегрального водяного пара по данным микроволнового комплекса AMSR-E ИСЗ Aqua. Принципиально новым результатом, полученным в данном исследовании, является обнаружение мультиджетовой спиральной структуры поля водяного пара, которая соединяет области водяного пара, приуроченные к облачному телу каждого из циклонов, а также к центральной экваториальной зоне водяного пара во внутритропической зоне конвергенции. Формирование этой области привело к резкой интенсификации тропического возмущения (ТВ) Hondo-II. Последующее нарушение этой сложной мультиджетовой структуры привело к быстрой диссипации ТВ Hondo-II и втягиванию посттайфунной формы ТВ Hondo-II в среднеширотный предантарктический фронт. Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 09-05-01019а.

**Ключевые слова:** тропические циклоны, интегральный водяной пар, микроволновое дистанционное зондирование.

### Введение

Фундаментальным вопросом при первоначальном циклогенезе и интенсификации различных форм тропических циклонов является выявление мощного и малоинерционного источника энергии, за счет которого чрезвычайно быстро возможна интенсификация и формирование зрелых форм тропических циклонов. Точка зрения о том, что этим источником может быть только акватория океана с высокой поверхностной температурой (более 26,5 °C) имеет длительную историю и множество приверженцев. Однако за последнее время появились признаки явной неудовлетворительности такой точкой зрения, например, в связи с катастрофически быстрой перестройкой и интенсификацией тропического циклона Katrina.

Принципиально иной подход продемонстрировали авторы работы [Шарков и др., 2008], в которой при мультиспектральном дистанционном изучении эволюции тропического циклона Gonu (Аравийское море, Северный Индийский океан; 31.05.2007–08.06.2007) в поле интегрального водяного пара было показано, что в условиях достаточно сухой атмосферы Аравийского моря единственным энергетическим источником, питающим ТЦ и, таким образом, дающим возможности его существования в течении достаточно длительного срока, явились зона повышенной концентрации водяного пара, захваченного самим ТЦ из экваториальной зоны водяного пара внутритропической зоны конвергенции (своего рода «эффект захвата»). При этом в исследованных метеорологических условиях полностью исключался режим натекания («засоса») водяного пара с акватории, окружающей тропической циклон. Аналогичный результат был получен несколько позже авторами работы [Ким и др., 2009а] при выявлении основного энергетического источника функционирования тропиче-

ского циклона Hondo в акватории Южного Индийского океана на основе метода «слияния» разномасштабных данных спутникового ИК- и микроволнового дистанционного зондирования в гидрометеорологических условиях, принципиально отличающихся от условий эволюции ТЦ Gonu. Кроме того, авторы предположили, что в первую очередь термическое взаимодействие с системами ТЦ Ivan и послужило причиной возникновения целого ряда уникальных особенностей в эволюционной истории ТВ Hondo-II и, в частности, образования вторичной интенсификации посттайфунных форм ТЦ Hondo-I.

Целью настоящей работы является исследование по данным спутниковых наблюдений принципиально нового механизма вторичной интенсификации посттайфунных форм ТЦ, который заключается в образовании мультиджетовой спиральной структуры поля водяного пара, соединяющей области водяного пара, приуроченные к облачному телу каждого из ТЦ и ТВ, а также к центральной экваториальной (материнской) зоне водяного пара во внутритропической зоне конвергенции.

### Эволюция тропического циклона Ivan

Тропический циклон пятой категории Ivan развивался, функционировал и диссилировал в акватории Южного Индийского океана с 04.02 по 22.02.2008 г. (рис. 1, 2). Его эволюционная история заимствована из электронной базы данных «Глобал-ТЦ» и сформирована с использованием методик препроцессинга [Покровская, Шарков, 2006] исходных («сырых») данных, представленных на международном сайте <http://www.solar.ifa.hawaii.edu>.

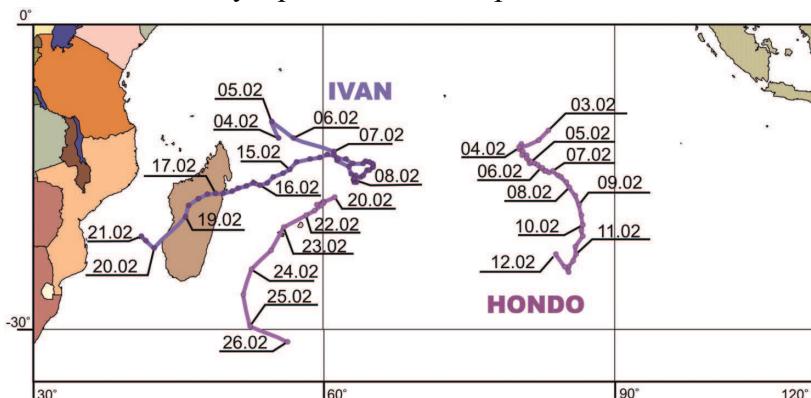


Рис. 1. Траектории движения тропических циклонов Ivan и Hondo в акватории Южного Индийского океана (данные представлены по официальным источникам)

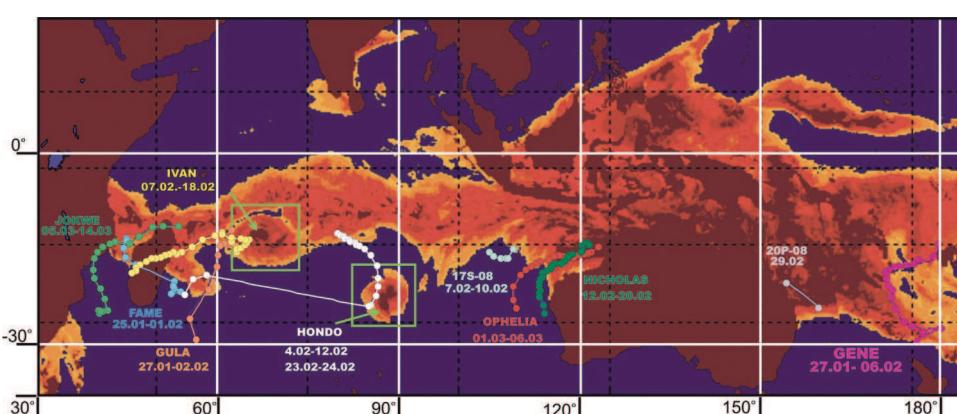


Рис. 2. Активность тропических циклонов в Индийском океане в январе–марте 2008 г. Траектории ТЦ представлены на фоне поля интегрального водяного пара в акватории Индийского океана и западной части Тихого океана за 11 февраля 2008 г. (суммарное усреднение)

Первичное тропическое возмущение этого ТЦ было зафиксировано 4 февраля в 03 ч в районе  $11,7^{\circ}$  ю.ш.,  $55,3^{\circ}$  в.д. и представляло собой размытую, плохо организованную облачную систему. Давление в центре составляло 1003 мб, скорость приземного ветра около 10 м/с. Облачный массив стал более плотным и организованным (рис. 3 $\alpha$ ; кадры ИК-диапазона). В течение 11–14 февраля интенсивность шторма периодически менялась, то усиливаясь, то ослабевая, при этом он сохранял очень слабое западное направление движения. 12 февраля зафиксирован облачный глаз. 13 февраля облачный массив приобрел неясные очертания, интенсивность снизилась до стадии тропического шторма. 14 февраля облачный диск вновь приобрел четкие очертания с хорошо выраженным облачными хвостами (см. рис. 3 $\alpha$ ; кадры видимого диапазона). 15 февраля, медленно приближаясь к северо-восточному побережью Мадагаскара, смещаясь над островами в открытом теплом океане в области со слабым сдвигом ветра в средней атмосфере, шторм усилился до стадии тайфуна, вновь появился облачный глаз

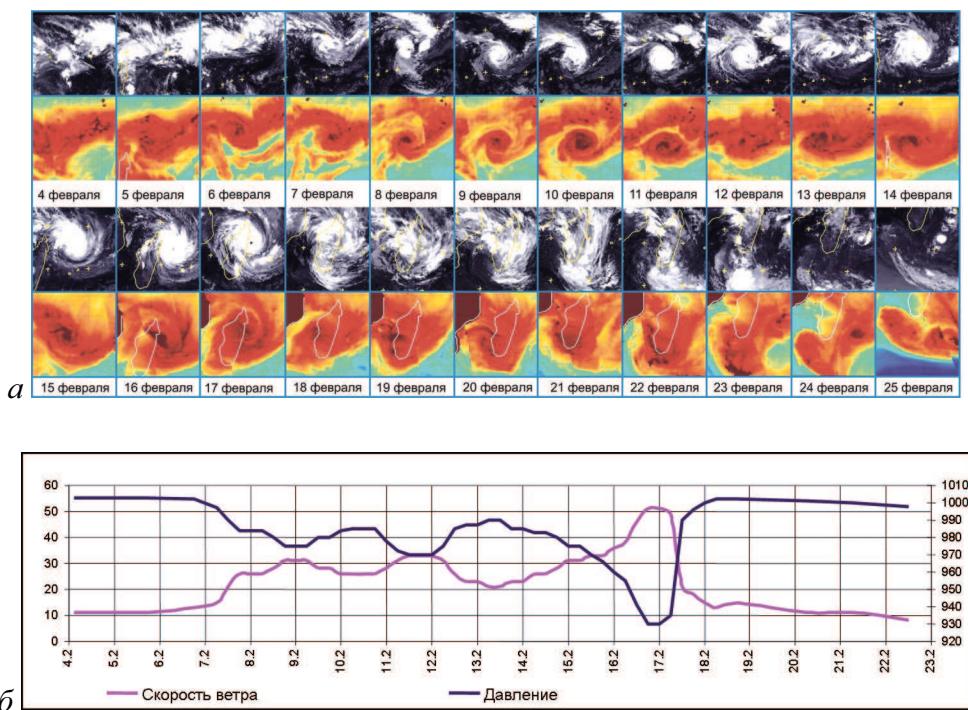


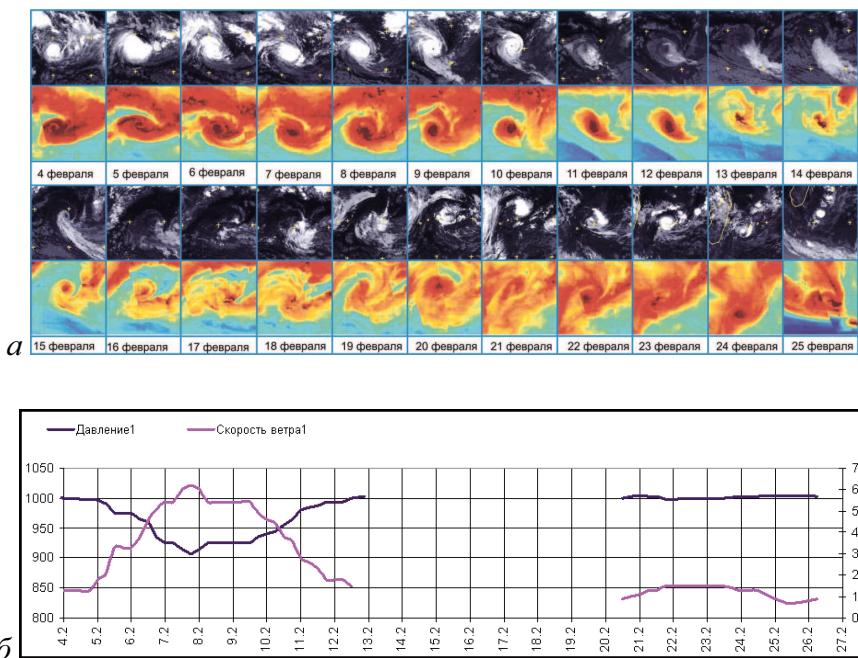
Рис. 3. Эволюция тропического циклона *Ivan* (4–25 февраля 2008 г.):  $\alpha$  — черно-белая последовательность кадров сформирована по данным ИК-диапазона (геостационарный ИЗС Meteosat-7) и цветная последовательность изображений полей интегрального водяного пара сформирована по микроволновым данным (прибор AMSR-E на борту ИСЗ *Aqua*);  $\beta$  — временная последовательность данных по максимальной скорости ветра (м/с) и приземное давление (мбар) (данные приведены по официальным источникам)

В течение 16 февраля в стадии тайфуна скорость ветра составляла около 50 м/с, он оказывает катастрофическое влияние на северо-восточное побережье Мадагаскара. Размер всей облачной системы к этому времени составлял около 1500 км. 17 февраля положение облачного глаза зафиксировано в районе города Мананара на восточном побережье острова. 18 февраля в стадии тропической депрессии система сместилась в Мозамбикский пролив, облачность приобрела размытый характер, сохраняя при этом округлые очертания. В центре возмущения грозовые штормы ослабели, но продолжали оставаться сильными к северу в зоне конвергенции с муссонным течением. В течение 19–20 февраля, смещаясь

в юго-западном, а затем в юго-восточном направлениях над водами пролива в стадии слабого тропического возмущения, облачная система циркуляции увеличилась в размерах, но стала плохо организованной. По прогнозу в течение трех последующих суток система должна была медленно смещаться в юго-юго-восточном направлении, трансформируясь в систему умеренных широт, и разрушиться в районе  $30^{\circ}$  ю.ш.

### Эволюция тропического циклона Hondo

Тропический циклон пятой категории Hondo развивался, функционировал и диссирировал в акватории Южного Индийского океана с 02.02 по 26.02.2008 г (см. рис. 1, 2). Однако его эволюционная история была достаточно необычна. Первичное тропическое возмущение возникло 2 февраля в 15 ч (по Гринвичу) на южной периферии внутритропической зоны конвергенции в районе  $11^{\circ}$  ю.ш.,  $83^{\circ}$  в.д. и представляло собой размытый плохо организованный облачный массив. В течение суток возмущение быстро усиливалось, появилось плотное центральное ядро небольших размеров с хорошо выраженным облачными хвостами. Небольшой общий размер возмущения способствовал быстрой интенсификации шторма (рис. 4a; кадры видимого диапазона).



*Рис. 4. Эволюция тропического циклона Hondo-I и тропического возмущения Hondo-II (4–25 февраля 2008 г.): а — черно-белая последовательность кадров сформирована по данным ИК-диапазона (геостационарный ИЗС Meteosat-7), цветная последовательность изображений полей интегрального водяного пара сформирована по микроволновым данным (прибор AMSR-E на борту ИСЗ Aqua); б — временная последовательность данных по максимальной скорости ветра (м/с) и приземное давление (мбар) (данные приведены по официальным источникам)*

6 февраля в 00 ч возмущение достигло стадии тайфуна, давление в центре продолжало быстро падать, образовался облачный глаз. 7 февраля в 18 ч возмущение достигло пика своей интенсивности. Давление в центре упало до 906 мб, скорость ветра достигла 62 м/с. В течение суток тайфун продолжал смещаться с небольшой скоростью в юго-восточном направлении. В течение 8 и 9 февраля интенсивность тайфуна менялась мало,

давление оставалось на уровне 925 мб, скорость ветра была 54–51 м/с. Общий размер системы оставался небольшим. Двигаясь на юго-юго-запад, тайфун смещался в район с холодной морской поверхностью, где температура составляла 25...26 °C. 10 и 11 февраля происходило постепенное ослабление возмущения, давление в центре быстро выросло, скорость ветра уменьшилась до 23 м/с, глубокая конвекция ослабла. 12 февраля, смещаясь к западу-северо-западу вдоль периферии субтропического гребня, вся система сильно ослабела, глубокая конвекция отсутствовала, возмущение разрушилось.

Важно отметить, что в течение 13–20 февраля Метеорологическими службами Франции (о. Реюньон) возмущение не фиксировалось (см. рис. 1, 2).

Однако 21 февраля этими же службами к востоку от о. Мадагаскар в районе 18° ю.ш., 60° в.д. была обнаружена организованная облачная система, идентифицированная как остаточная форма ТЦ Hondo. Данная идентификация, однако, по нашему мнению, является достаточно спорной по причинам, которые мы рассмотрим ниже. Указанная облачная система сопровождалась активными грозовыми штормами. Смещение в северо-западном направлении по периферии субтропического гребня способствует усилинию приземного ветра до 15 м/с и возникновению тропической депрессии. 25 февраля, двигаясь в юго-юго-восточном направлении вокруг субтропического гребня, возмущение медленно трансформировалось в систему умеренных широт в районе 30° ю.ш., 60° в.д. Указанная достаточно необычная эволюционная история ТЦ Hondo была зафиксирована на международном сайте <http://www.solar.ifa.hawaii.edu>, и авторами настоящей работы воспроизведена в художественной форме на рис. 1 работы [Ким и др., 2009a].

## Исходные данные космического зондирования

Исходными данными для работы послужили данные с сайта <http://www.remss.com> (Remote Sensing Systems) с микроволновых комплексов AMSR-E ИСЗ Aqua, обновляющиеся в реальном времени, а также оптических изображения акватории Южного Индийского океана с геостационарного ИСЗ Meteosat-7. На основе временной серии оптических и микроволновых изображений был сформирован анимационный фильм по эволюции ТЦ Ivan (04.02–22.02.2008 г.) и ТЦ Hondo (03.02–26.02.2008 г.) в поле водяного пара, который и был представлен авторами на Седьмой Всероссийской Открытой ежегодной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли» [Ким и др., 2009б].

## Методика и алгоритмы обработки информации

Целью работы, как было сказано выше, являлась оценка общей энергетики области интегрального водяного пара, сопровождающего тропический циклон, с использованием готовых продуктов обработки спутниковых данных. Как было показано выше, в работе были использованы данные оптических каналов геостационарного ИСЗ Metesat-7 и продукт восстановления интегрального водяного пара по данным микроволнового комплекса AMSR-E ИСЗ Aqua, которые были обработаны по предлагаемому авторами алгоритму. В качестве примера на рис. 2 приведена глобальная карта интегрального содержания водяного пара по всем акваториям Мирового океана, усредненная за сутки, с выделением исследуемых ТЦ и ТВ.

Для определения области интегрирования авторы использовали изображения видимого диапазона, полученные с геостационарного спутника Meteosat-7, поскольку в оптической области спектра циклон распознается по структурным особенностям облачных масс. Временной ряд композиций (кадров) попарных изображений видимого канала ИЗС Meteosat-7 и поля интегрального водяного пара, приведенные к одинаковому масштабу и отображающие различные стадии эволюции и трансформации тропических циклонов Ivan и Hondo и сопутствующих метеорологических систем за срок с 04 по 27 февраля 2008 г., представлены на рис. 3, 4.

Перевод полученных значений количества влаги в величину скрытой энергии проводился исходя из следующих предположений: осажденный водяной пар толщиной 1 мм (по исходным данным) соответствует, с учетом плотности воды  $1 \text{ г}/\text{см}^3$ , массе воды 1 кг на площади  $1 \text{ м}^2$  и удельная теплота фазового перехода пар-вода составляет  $2,5 \cdot 10^6 \text{ Дж}/\text{кг}$ . В результате всех этих шагов были получены значения энергии скрытой теплоты областей водяного пара (Дж), сопровождающих тропические циклоны для всех стадий его эволюции, которые представлены на рис. 5, 6.

### **Особенности временной эволюция ТЦ Hondo и Ivan и их взаимодействия в поле интегрального водяного пара**

В результате применения модифицированного авторами метода слияния данных получена временная серия сдвоенных кадров за весь цикл эволюции ТЦ Hondo и Ivan, скомбинированных в одном масштабе (см. рис. 3, 4) и включавших в себя изначально разномасштабные космические оптические изображения, полученные с ИСЗ Meteosat-7 (верхняя черно-белая половина кадра), и изображения областей интегрального водяного пара (нижняя цветная половина кадра) по микроволновым данным ИСЗ Aqua. По полям интегрального водяного пара производились дальнейшие энергетические расчеты. Из рис. 3, 4 непосредственно видно, что область повышенного (по отношению к невозмущенной циклоном атмосфере) содержания интегрального водяного пара строго соответствует облачному массиву (по оптическим данным) тропического циклона. Эта область в поле водяного пара как бы соответствует центру действия циклона. Однако сама область имеет пространственные размеры существенно большие, чем отражено облачными структурами в видимом диапазоне.

Отметим также, что пространственно-временная вариабельность полей оптических и водяного пара приводит к тому, что полная их тождественность отсутствует. Это хорошо видно при эволюции ТЦ Ivan на совместных кадрах за 08–10 февраля 2008 г. и 23–25 февраля 2008 г. (см. рис 3а). Кроме того, важным фактором эволюции тропического циклона является то, что область, приуроченная непосредственно к тропическому циклону (облачные массы), имеет значительную переходную зону, состыкованную с основным полем водяного пара экваториальной зоны пара через потоковые структуры («джеты»). Скорее всего, через переходную зону происходит своего рода «подпитка» тропического циклона водяным паром из основной экваториальной области.

Доказательством может служить сложная эволюция области водяного пара, соответствующей ТЦ Hondo. Так, при выходе из материнского поля в форме тропической депрессии (4 февраля) со значительным запасом скрытой теплоты (порядка  $1,3 \cdot 10^{20} \text{ Дж}$ ) (см. рис. 5) ТЦ быстро (за 6 ч) интенсифицировался до стадии урагана и поддерживался в

таком состоянии до 10 февраля. Именно в эти сутки происходит разрыв питающего джета (см. рис. 4a), что приводит к быстрой (2...3 сут), практически полной, диссипации циклона (к 15 февраля). В течение 10–15 февраля собственное поле водяного пара ТЦ резко теряет свою скрытую энергию (до  $2 \cdot 10^{19}$  Дж). Уже к концу суток 12 февраля ТЦ заполнился (см. рис. 4б) и перешел в форму первичного тропического возмущения (табл. 2), что хорошо распознается на ИК-изображениях эволюции ТЦ Hondo (см. рис. 4a).

Официальные метеослужбы прекратили слежение за этим ТЦ (см. рис. 4б). Однако в это же время произошел захват остатков облачного тела и поля водяного пара от ТЦ Hondo дальней спиральной ветвью циркуляции сильного ТЦ Ivan, образовавшегося 7 февраля около о. Мадагаскар и быстро (за 7...8 ч) вышедшего на стадию урагана, которая удерживалась в течение 15–17 февраля (см. табл. 1). 15 февраля началось формирование (см. рис. 4a) нового джета из центральной экваториальной области (зона ВЗК), что обеспечило появления вторичного генезиса практически распавшегося тела ТЦ Hondo и формирования нового тропического возмущения. 19 февраля из центральной экваториальной области образовался второй питающий джет. На следующие сутки (20 февраля) они слились в единый джет. 21–22 февраля произошло слияние этой области с областью повышенного содержания водяного пара, расположенного около восточного побережья о. Мадагаскар, в единую область повышенного содержания водяного пара, что усилило тропическое образование до уровня тропической депрессии (21–24 февраля) с последующей диссипацией при разрыве питающего его джета (25 февраля).

Из анализа сказанного следует, что тропическая депрессия, приписываемая (по официальным источникам) ТЦ Hondo, на самом деле является самостоятельным тропическим возмущением, сформированным на периферии ТЦ Ivan, и которому следует приписать собственное наименование ТВ Honda-II.

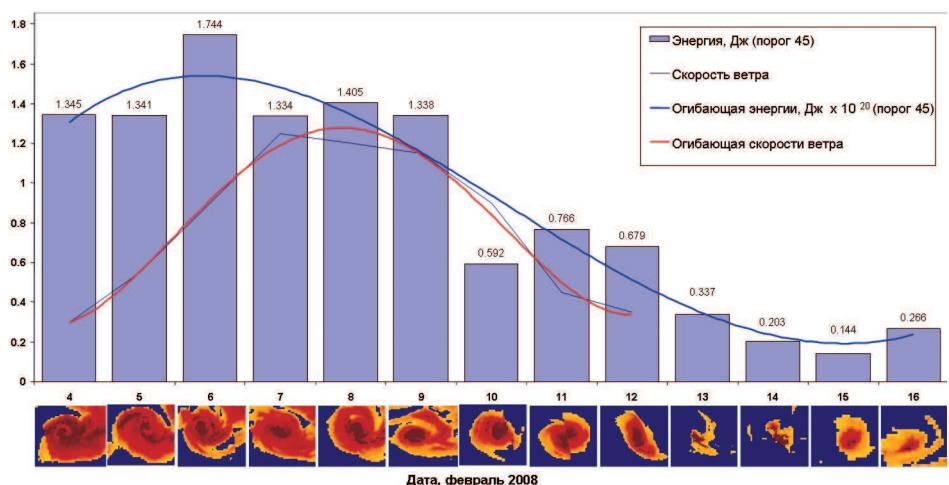


Рис. 5. Распределение энергии (скрытая теплота) в зоне водяного пара, приуроченного к ТЦ Hondo-I (4–16 февраля 2008 г.). Вставка внизу рисунка показывает области водяного пара, по которым выполнено интегрирование

Из анализа результатов расчета, представленных на рис. 5–6, следует, что за период 04.02–06.02.2008 г. с нарастанием интенсивности тропического циклона, в частности скорости ветра в стене глаза, постепенно увеличивается и суммарная скрытая энергия в области водяного пара за счет «вытягивания» массы водяного пара из экваториальной области. В течение суток 06.02–07.02.2008 г. происходит резкая интенсификация тропического циклона (рис. 4), и в момент максимальной стадии развития (07.02.2008 г.) энергия в

области водяного пара понижается приблизительно на  $0,5 \cdot 10^{20}$  Дж. Можно предположить, что именно это количество скрытой энергии пошло на увеличение кинетической энергии циклона, поскольку в окрестности циклона отсутствует какой-либо другой источник энергии с равнозначной мощностью.

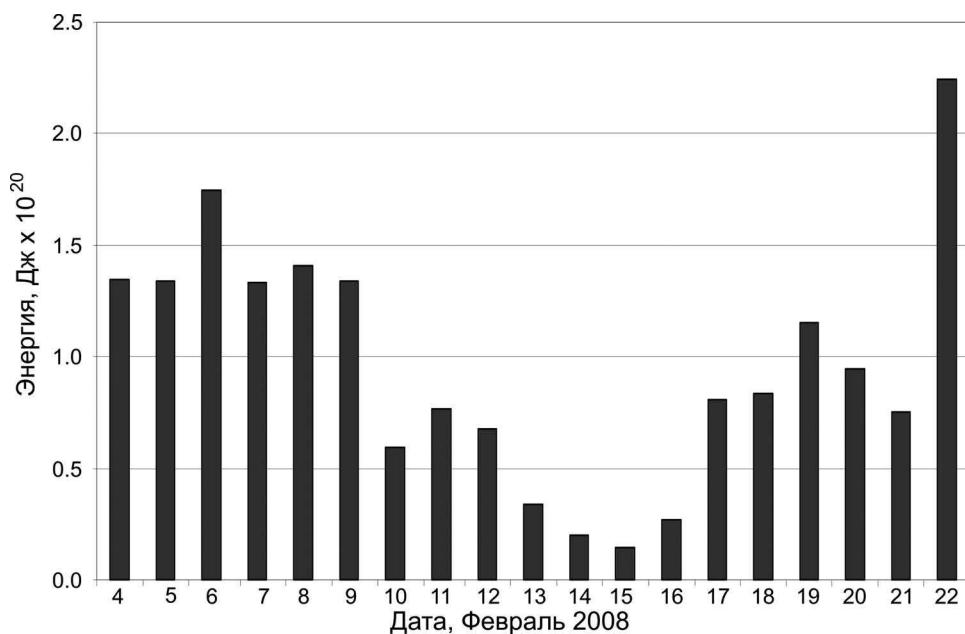


Рис. 6. Распределение энергии скрытой теплоты в зонах водяного пара ТЦ Hondo-I и ТВ Hondo-II (4–22 февраля 2008 г.)

В течение 09.02–10.02.2008 г., как мы уже отмечали, происходит разрыв джета, соединяющего область циклона с центральной экваториальной областью, и, соответственно, снижение интенсивности циклона. При этом область водяного пара существенно диффундирует, теряя запасенную скрытую теплоту очень быстрыми темпами: так, за 8 сут запас скрытого тепла уменьшился на  $1,3 \cdot 10^{20}$  Дж. Таким образом, темп диссилируемой мощности составил  $2 \cdot 10^{14}$  Вт. Однако, как мы отмечали, с 15–16 февраля образуется новый джет, который будет накачивать остатки ТЦ скрытой теплотой, что хорошо видно по возрастанию запаса скрытого тепла 16 февраля (см. рис. 5). В дальнейшем к 19–20 февраля формируется второй максимум запаса скрытой теплоты (см. рис. 6) для генезиса тропической депрессии. Слияние 21 февраля двух областей водяного пара резко увеличивает энергию скрытой теплоты объединенного поля до  $2,2 \cdot 10^{20}$  Дж. Окончательное разрушение новой тропической структуры, включая и сформированную тропической депрессией область водяного пара, происходит благодаря втягиванию их во фронтальную зону средних широт.

## Заключение

Принципиально новый результат, полученный в данном исследовании, – это обнаружение мультиджетовой спиральной структуры поля водяного пара, которая соединяет области водяного пара, приуроченные к облачному телу каждого из циклонов, а также центральную экваториальную зону водяного пара во внутритропической зоне конвергенции. Нарушение этой сложной джетовой структуры быстро приводит к диссипации одного из взаимодействующих ТЦ. Дополнительное же формирование такой джетовой струк-

туры приводит к повторной интенсификации одного из ТЦ и его посттайфунных форм. Разрыв питающего джета приводит к быстрой (1–2 сут) диссипации циклона. Однако формирование новых джетов из центральной экваториальной области дает возможность образования вторичного генезиса практически распавшегося тела ТЦ Hondo и формирования нового тропического образования до уровня тропической депрессии с последующей диссипацией при разрыве питающего его джета.

## Литература

1. [Ким и др., 2009 а] Ким Г.А., Шарков Е.А., Покровская И.В. Эволюция и энергетическая структура тропического циклона Hondo по данным оптико-микроволнового спутникового зондирования // Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов: Сб. науч. ст. Вып. 6. М.: Азбука-2000, 2009. Т. 2. С. 126–136.
2. [Ким и др., 2009б] Ким Г.А., Шарков Е.А., Покровская И.В. Особенности взаимодействия тропических циклонов Hondo и Ivan в поле интегрального водяного пара // 7-я Всерос. Открытая ежегодная конф. «Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». Москва, ИКИ РАН, 16–20 нояб. 2009: Сб. тез. конф. [Электрон. ресурс]. М.: ИКИ РАН, 2009. С. 151. 1 CD-диск.
3. [Покровская, Шарков, 2006] Покровская И.В., Шарков Е.А. Тропические циклоны и тропические возмущения Мирового океана: хронология и эволюция. Версия 3.1. (1983–2005). М.: Полиграф сервис, 2006. 728 с.
4. [Шарков и др., 2008] Шарков Е.А., Ким Г.А., Покровская И.В. Эволюция и энергетические особенности тропического циклона GONU с использованием метода «слияния» разномасштабных дистанционных данных // Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов: Сб. науч. ст. Вып. 5. М.: Азбука-2000, 2008. Т. 1. С. 530–538.

## Features of the Interaction between Tropical Cyclones Hondo and Ivan in the Water Vapor Fields

G.A. Kim<sup>1</sup>, E.A. Sharkov<sup>2</sup>, I.V. Pokrovskaya<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Scientific Center of Aerospace Monitoring “Aerocosmos”  
105064 Moscow, Gorochovski by-street, 4  
E-mail: kim@isintech.com;

<sup>2</sup> Space Research Institute Russian, Academy of Sciensec,  
Moscow 117997, Profsouznaya Str., 84/32  
E-mail: easharkov@iki.rssi.ru

In the paper, the detailed analysis of tropical cyclone Hondo (South Indian Ocean, 02.02.2008–27.02.2008) energy properties by IR and microwave multi-scale satellite data has been studied. On the base of TC evolution investigation it was experimental detected one of main energy sources of functioning of the tropical cyclone. As a result of studies it was shown that the only feasible source is the precipitable water vapor field that TC captured from tropical zone with monsoonal circulation and conserved during all evolution stage.

**Keywords:** tropical cyclones, precipitable water vapor, microwave remote sensing.