

## ЭВОЛЮЦИЯ ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОНА HONDO В ПОЛЕ ЭКВАТОРИАЛЬНОГО ВОДЯНОГО ПАРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОГО ПОДХОДА

© 2011 г. Е. А. Шарков<sup>1\*</sup>, Г. А. Ким<sup>2</sup>, И. В. Покровская<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Учреждение Российской академии наук Институт космических исследований РАН, Москва

<sup>2</sup> Научный центр аэрокосмического мониторинга “АЭРОКОСМОС”, Москва

\* E-mail: e.sharkov@mail.ru

Поступила в редакцию 13.04.2010 г.

В работе проведен детальный анализ энергетических особенностей тропического циклона (ТЦ) Hondo (Южный Индийский океан, 02.02.2008–27.02.2008) на основе метода “слияния” разномасштабных данных спутникового дистанционного зондирования (ДЗ). В результате детального исследования эволюции ТЦ экспериментально выявлен один из главных энергетических источников его функционирования. По результатам анализа показано, что единственным возможным источником является область водяного пара повышенной интегральной концентрации, захваченной циклоном из тропической зоны с муссонной циркуляцией атмосферы и сохраненной им на протяжении всего этапа его эволюции при помощи подпитки от основной экваториальной области водяного пара через мульти-поточковые структуры (джеты).

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

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных аспектов исследования системы океан–атмосфера является изучение взаимодействия интенсивных вихревых возмущений типа тропических циклонов (ТЦ) с атмосферой экваториальной зоны и зоны средних широт на различных этапах эволюции атмосферных катастроф. Эта проблема тесно связана с задачей изучения возможных вариаций климата планеты (Шарков, 2010; Sharkov, 2000; Tremberth, Fasullo, 2007). При этом фундаментальным вопросом при первоначальном циклогенезе и интенсификации различных форм (ТЦ) является выявление мощного и малоинерционного источника энергии, за счет которого чрезвычайно быстро происходят интенсификация и формирование зрелых форм ТЦ. Точка зрения о том, что этим источником может быть только акватория океана с высокой поверхностной температурой ( $>26.5^{\circ}\text{C}$ ), имеет длительную историю и множество приверженцев (см. обзоры (Шарков, 2006, 2010; Sharkov, 1998)). Однако за последнее время появились четкие признаки явной неудовлетворительности такой точкой зрения, например, в связи с катастрофически быстрой перестройкой и интенсификацией ТЦ Katrina. При этом специальные космические и наземные службы наблюдения США оказались не способны зарегистрировать сколько-нибудь заблаговременно этот процесс, поскольку были

ориентированы на стандартные процедуры, направленные на поиск термодинамических особенностей акваторий (т.н. модель “теплой” воды), над которыми проходит ТЦ.

Предыдущие исследования авторов при мультиспектральном дистанционном изучении эволюции ТЦ Goni (Аравийское море, Северный Индийский океан; 31.05.2007–08.06.2007) в поле интегрального водяного пара (Шарков и др., 2008а, 2008б) показали, что в условиях достаточно сухой атмосферы Аравийского моря единственным энергетическим источником, питающим ТЦ и, таким образом, дающим возможности его существования в течение достаточно длительного срока, явилась зона повышенной концентрации водяного пара, захваченного самим ТЦ из экваториальной зоны водяного пара (своего рода “эффект захвата”). При этом в исследованных метеорологических условиях полностью исключался режим натекания (“засоса”) водяного пара с акватории, окружающей ТЦ.

Цель настоящей работы – попытка выявить основной энергетический источник функционирования ТЦ Hondo в акватории Южного Индийского океана на основе метода “слияния” разномасштабных данных спутникового ДЗ в гидрометеорологических условиях, принципиально отличающихся от условий эволюции ТЦ Goni. Выбор этого физического объекта обоснован несколькими обстоя-

тельствами, в первую очередь тем, что генезис и эволюция этого циклона происходили непосредственно в экваториальной зоне повышенного содержания интегрального водяного пара Южного Индийского океана, а также в зоне действия возникших в это же время двух интенсивных ТЦ Gula и Ivan. Термическое и динамическое взаимодействия с указанными системами и послужили причиной возникновения целого ряда уникальных особенностей в эволюционной истории ТЦ Hondo.

### ЭВОЛЮЦИЯ ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОНА HONDO

ТЦ пятой категории Hondo развивался, функционировал и диссипировал в акватории Южного Индийского океана с 02.02.2008 г. по 26.02.2008 г. Однако его эволюционная история была достаточно необычна (см. таблицу, которая была заимствована из электронной базы данных “Глобал-ТЦ” и сформирована с использованием методик препроцессинга (Покровская, Шарков, 2006) исходных данных, представленных на международном сайте <http://www.solar.ifa.hawaii.edu>).

Первичное тропическое возмущение возникло 2 февраля 2008 г. в 15:00 GMT на южной периферии внутритропической зоны конвергенции (ВЗК) в районе 11° ю.ш., 83° в.д. и представляло собой размытый, плохо организованный облачный массив. Давление на уровне моря составляло 1004 мб, скорость ветра около 10 м/с. В течение следующих суток происходило усиление грозовой активности, давление в центре системы упало на 4 мб, что способствовало интенсификации возмущения и переходу его в стадию тропической депрессии. Облачный диск приобрел более четкие очертания. 5 февраля при благоприятных окружающих условиях произошли усиление ветра и переход возмущения в тропический шторм. Давление упало до 997 мб, скорость ветра возросла до 18 м/с. В течение суток возмущение быстро усиливалось, появилось плотное центральное ядро небольших размеров с хорошо выраженными облачными хвостами. Небольшой общий размер возмущения способствовал быстрой интенсификации шторма. 6 февраля в 00:00 GMT возмущение достигло стадии тайфуна, давление в центре продолжало быстро падать, образовался облачный глаз. Слабый сдвиг ветра под высотным гребнем, расположенным на уровне 700 мб и 500 мб поверхностей, высокий уровень дивергенции создавали благоприятные условия для дальнейшего усиления возмущения. 7 февраля в 18:00 GMT 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 54–51 м/с. Общий размер системы оставался небольшим. Двигаясь на 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 росло, скорость ветра уменьшилась до 23 м/с, глубокая конвекция ослабела.

12 февраля, смещаясь к западу–северо-западу вдоль периферии субтропического гребня, вся система сильно ослабевает, глубокая конвекция отсутствует, возмущение разрушается.

В течение 13–20 февраля Метеорологическими службами Франции (о-в Реюньон) возмущение не фиксируется (рис. 1 на цветн. вклейках).

Однако 21 февраля к востоку от о-ва Мадагаскар в районе 18° ю.ш., 60° в.д. была обнаружена организованная облачная система, идентифицированная метеослужбами о-ва Реюньон как остаточная форма ТЦ Hondo. Указанная облачная система сопровождалась активными грозовыми штормами. Смещение в северо-западном направлении по периферии субтропического гребня способствует усилению приземного ветра до 15 м/с и возникновению тропической депрессии. В течение 22–23 февраля ослаблению возмущения препятствовали теплый океан и благоприятные атмосферные условия. 24 февраля, продолжая свое движение к югу, система переместилась на холодную морскую поверхность с температурой 26°C и ослабела. 25 февраля, продвигаясь 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.

### 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 режиме времени, а также ИК-изображения акватории Южного Индийского океана с геостационарного ИСЗ Meteosat-7. На основе временной серии ИК-изображений был сформирован анимационный фильм по эволюции ТЦ Hondo (03.02.2008–26.02.2008), который авторы представили на Шестой Всероссийской открытой ежегодной конференции “Современные проблемы

дистанционного зондирования Земли из космоса” (Москва, ИКИ РАН, 10–14 ноября 2008 г.) (Ким и др., 2008).

В работе были использованы пространственно-временные комбинации изображений продуктов восстановления интегрального содержания водяного пара в атмосфере и ИК-изображений облачных систем, приведенные к одинаковому масштабу методом слияния, поскольку только в таком случае наиболее полно отражаются процессы энергетических преобразований, проходящие в тропической зоне.

Полный алгоритм восстановления данных о полном содержании влаги в атмосфере подробно описан на сайте [www.ssmi.com/amsr/amsr\\_data\\_description.html#amsre\\_data](http://www.ssmi.com/amsr/amsr_data_description.html#amsre_data). Данные с приборов SSM/I и AMSR-E обрабатывались в соответствии с традиционными методами восстановления параметров атмосферы по спутниковым микроволновым данным.

### МЕТОДИКА И АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Авторами проведен детальный анализ энергетических особенностей ТЦ Нондо на основе пространственно-временного метода “слияния” (Data Merging Method), представляющий собой развитие методики формирования и накопления информации по разномасштабным данным спутникового ДЗ. Указанный метод в настоящее время активно развивается для исследования практически стационарных объектов и полей, таких как, например, поле содержания хлорофилла на океанической поверхности (Gregg, 2007). В случае же его использования для таких быстропротекающих процессов, как эволюция ТЦ, требуется существенная корректировка метода, которая впервые проведена авторами при анализе эволюции ТЦ Gonu (Шарков и др., 2008а, 2008б) и в настоящей работе усовершенствована.

Целью работы, как было сказано выше, являлась оценка общей энергетики области интегрального водяного пара, сопровождающего ТЦ, с использованием готовых продуктов обработки спутниковых данных. В работе были использованы данные оптических каналов геостационарного ИСЗ Meteosat-7 и продукт восстановления интегрального водяного пара по данным микроволнового комплекса AMSR-E/Aqua, которые были обработаны по предложенному авторами алгоритму (рис. 2).

Исходные данные содержания водяного пара в атмосфере были представлены в виде архивов бинарных файлов, поэтому первым этапом в обработке этих данных послужил блок считывания файла, разработанный в среде программирования MATLAB.

Для восстановления полной картины водяного пара было произведено слияние витков на нисходящих и восходящих орбитах. Данные, полученные в результате этого процесса, содержали лакуны (области отсутствия дистанционной информации), которые были устранены с помощью метода линейной интерполяции среды MATLAB, функцией `griddata`.

Далее для расчета энергии ТЦ было произведено выравнивание интерполированных данных по координатам и времени, а также выделение зон ливневых осадков, непременно присутствующих в ТЦ, в которых отсутствовали данные о водяном паре. В результате исследования влияния их значения на расчет энергии, исходя из физических предпосылок о предельном содержании водяного пара и процессе его конденсации, было подобрано оптимальное соответствие зон ливневых осадков количеству водяного пара. Таким образом, был получен массив данных содержания водяного пара для всей акватории Мирового океана, где один пиксел соответствовал площади на земной поверхности от 10 до 28 км (из-за особенностей проекции). В качестве примера на рис. 3 (на цветн. вклейках) приведена глобальная карта интегрального содержания водяного пара по всем акваториям Мирового океана, усредненная за сутки.

Следующей задачей в расчете было выделение областей интегрирования, т.е. распознавание образа ТЦ. Несмотря на существующие методы автоматизированного выделения областей вихревых возмущений по снимкам оптического диапазона, в данной работе перед авторами стояла задача выделения областей интегрального водяного пара, приуроченного к каждому этапу эволюции циклона. Авторы посчитали оптимальным выделение вручную области интегрирования в поле водяного пара по целому ряду причин. Это определялось, прежде всего, ограниченным числом изображений, а также необходимостью выделения зоны повышенного содержания водяного пара для каждого конкретного изображения (что соответствовало конкретному этапу в эволюции циклона). Поскольку на каждом этапе эволюции ТЦ сопровождающее его поле водяного пара сложным образом эволюционировало, то выполнить процедуру распознавания автоматизированными методами идентификации пока не представляется возможным. Кроме того, при выделении области интегрирования возникла проблема, состоящая в том, что на ранних этапах генезиса ТЦ идентификация области водяного пара, сопровождающая его, трудно распознаваема от зоны водяного пара внутритропической зоны конвергенции, то есть от области своего энергетического “питания” (в ВЗК). Для того чтобы разрешить эту задачу, авторы использовали изображения ИК-диапазона, полученные с геостационарного спутника



Рис. 2. Блок-схема алгоритма обработки данных.

Meteosat-7, поскольку в ИК-области спектра циклон распознается по структурным особенностям облачных масс (Dvorak, 1984; Sharkov, 1998). Временной ряд композиций (кадров) попарных изображений ИК-канала Meteosat-7 и поля интегрального водяного пара, приведенных к одинаковому масштабу и отображающих различные стадии эволюции и трансформации ТЦ Hondo и сопутствующих метеорологических систем в период с 4 февраля по 27 февраля 2008 г., представлен на рис. 4 (на цветн. вклейках).

Вторым критерием выделения циклона послужило пороговое значение водяного пара, ниже которого интересующее нас образование ТЦ зрелых форм не являлось. Таким образом, на основании перечисленных выше критериев выбиралась область интегрирования, по которой производился расчет интегрального содержания водяного пара с получением общего содержания пара (в

миллиметрах) в зоне водяного пара, сопровождающего ТЦ.

Перевод полученных значений количества влаги в величину скрытой энергии проводился исходя из следующих предположений: осажденный водяной пар с толщиной в 1 мм (по исходным данным) соответствует – с учетом плотности воды в  $1 \text{ г/см}^3$  – массе воды в 1 кг на площади в  $1 \text{ м}^2$ . С другой стороны, известно (Физический энциклопедический словарь, 1984), что удельная теплота фазового перехода пар–вода составляет  $2.5 \times 10^6 \text{ Дж/кг}$ . Таким образом, при толщине осажденного пара в 1 мм величина скрытой теплоты конденсации составит  $2.5 \times 10^{12} \text{ Дж}$  на площади в  $1 \text{ км}^2$ .

Площадь зоны интегрирования из пикселей, в которых она была представлена в исходном массиве данных, была переведена в квадратные ки-

лометры, для чего был рассчитан массив перевода площади.

В результате всех этих шагов получены значения энергии скрытой теплоты сопровождающего ТЦ области водяного пара (Дж) для всех стадий его эволюции (представлены на рис. 5 на цветн. вклейках).

### ОСОБЕННОСТИ ВРЕМЕННОЙ ЭВОЛЮЦИИ ТЦ HONDO И СОПРОВОЖДАЮЩЕГО ЕГО ПОЛЯ ВОДЯНОГО ПАРА

В результате применения модифицированного авторами метода слияния данных были получены временная серия сдвоенных кадров за весь цикл эволюции ТЦ Hondo, скомбинированных в одном масштабе (рис. 4) и включающих в себя изначально разномасштабные космические ИК-изображения, полученные с ИСЗ Meteosat-7 (верхняя черно-белая половина кадра), и изображения областей интегрального водяного пара (нижняя цветная половина кадра), по которым производился дальнейший расчет (продукт по микроволновым данным ИСЗ Aqua). Из рис. 4 непосредственно видно, что область повышенного (по отношению к невозмущенной циклоном атмосфере) содержания интегрального водяного пара строго соответствует облачному массиву (по ИК-данным) ТЦ. Эта область в поле водяного пара как бы приурочена к центру действия циклона. Однако сама область водяного пара имеет пространственные размеры, существенно большие, чем отражено облачными структурами в ИК-диапазоне. Кроме того, важным элементом эволюции ТЦ является то, что зона, приуроченная непосредственно к ТЦ (облачные массы), имеет значительную переходную зону, состыкованную с основным полем водяного пара экваториальной зоны пара через потоковые структуры (джеты). Скорее всего, через переходную зону (джет) происходит своего рода “подпитка” ТЦ водяным паром из основной экваториальной зоны. Доказательством может служить разрыв питающего джета в промежуток между 9 и 10 февраля (рис. 4), что привело к быстрой (2–3 сут) практически полной диссипации циклона (15 февраля). Однако в это же время произошел захват остатков тела ТЦ Hondo дальней спиральной ветвью циркуляции сильного ТЦ Ivan, образовавшегося 7 февраля около о-ва Мадагаскар и быстро (за срок 7–8 ч) вышедшего на стадию STS. 14 февраля началось формирование (рис. 4) нового джета из центральной экваториальной области, что обеспечило возможность вторичного генезиса практически распавшегося тела ТЦ Hondo и формирования нового тропического возмущения. 19 февраля образовался второй питающий джет из центральной экваториальной области. 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-ва 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). В дальнейшем облачные массы тропического возмущения и сопровождающего поля водяного пара были втянуты во фронтальную зону умеренных широт в приантарктической зоне (26–27 февраля) и прекратили свое самостоятельное существование. 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.

Теперь рассмотрим эволюцию суточного значения энергии скрытой теплоты поля водяного пара, сопровождающего тело ТЦ Hondo, и его динамических характеристик (максимальная скорость ветра в стене глаза циклона) за срок с 4 по 16 февраля 2008 г. (рис. 5).

Из анализа результатов расчета, представленных на рис. 5, следует, что с нарастанием интенсивности ТЦ, в частности скорости ветра в стене глаза, за период 04.02.2008–06.02.2008 (см. пп. 3–13 таблицы) постепенно увеличивается и суммарная скрытая энергия в области водяного пара за счет “вытягивания” массы водяного пара из экваториальной области. В течение суток 06.02.2008–07.02.2008 г. происходит резкая интенсификация ТЦ (см. пп. 11–16 таблицы и рис. 4), и в момент максимальной стадии развития (07.02.2008) энергия в области водяного пара понижается приблизительно на  $0.5 \times 10^{20}$  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. В течение 09.02.2008–10.02.2008, как мы уже отмечали, происходят 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  $1.3 \times 10^{20}$  Дж. Таким образом, темп мощности диссипации составил  $2 \times 10^{14}$  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 (рис. 5). В дальнейшем к 22–23 февраля будет сформирован второй максимум запаса скрытой теплоты (не показан на рис. 5) для генезиса тропи-

Эволюция ТЦ Hondo (02.02.2008–27.02.2008)

Номер ТЦ = SIO 0803

Имя ТЦ = Hondo

Всего точек = 52

| №  | Стадия развития возмущения** | Дата, мм_дд | Время, УТ | Широта, град | Долгота, град | Давление, мбар | Скорость ветра в центре возмущения, м/с | Направление смещения возмущения, румбы | Скорость смещения, узлы*** |
|----|------------------------------|-------------|-----------|--------------|---------------|----------------|---|--|----------------------------|
| 1  | TL                           | 02_02       | 15        | -10.9        | 83.1          | 1005           | 8                                       | W                                      | 10                         |
| 2  | TL                           | 02_03       | 6         | -11.9        | 82.1          | 1004           | 11                                      | SW                                     | 10                         |
| 3  | TD                           | 02_04       | 0         | -12.8        | 80.1          | 1000           | 13                                      | WSW                                    | 8                          |
| 4  | TD                           | 02_04       | 6         | -12.3        | 80.3          | 999            | 13                                      | NE                                     | 5                          |
| 5  | TD                           | 02_04       | 12        | -12.6        | 80.1          | 998            | 13                                      | SW                                     | 2                          |
| 6  | TD                           | 02_04       | 18        | -13.0        | 80.5          | 998            | 13                                      | SE                                     | 4                          |
| 7  | TS                           | 02_05       | 0         | -13.4        | 80.4          | 997            | 18                                      | S                                      | 3                          |
| 8  | TS                           | 02_05       | 6         | -13.4        | 80.9          | 990            | 21                                      | E                                      | 3                          |
| 9  | T                            | 02_05       | 12        | -13.7        | 80.9          | 975            | 33                                      | S                                      | 3                          |
| 10 | T                            | 02_05       | 18        | -13.9        | 81.1          | 975            | 33                                      | SE                                     | 3                          |
| 11 | T                            | 02_06       | 0         | -14.2        | 81.2          | 975            | 33                                      | S                                      | 3                          |
| 12 | T                            | 02_06       | 6         | -14.1        | 81.3          | 965            | 38                                      | 0                                      | 0                          |
| 13 | T                            | 02_06       | 12        | -14.2        | 81.7          | 960            | 46                                      | ESE                                    | 3                          |
| 14 | T                            | 02_06       | 18        | -14.4        | 82.0          | 934            | 51                                      | SE                                     | 10                         |
| 15 | T                            | 02_07       | 0         | -14.7        | 82.3          | 925            | 54                                      | SE                                     | 3                          |
| 16 | T                            | 02_07       | 6         | -14.7        | 82.5          | 925            | 54                                      | E                                      | 3                          |
| 17 | T                            | 02_07       | 12        | -15.0        | 82.7          | 915            | 60                                      | SE                                     | 3                          |
| 18 | T                            | 02_07       | 18        | -15.0        | 82.9          | 906            | 62                                      | E                                      | 3                          |
| 19 | T                            | 02_08       | 0         | -15.1        | 83.2          | 915            | 60                                      | ESE                                    | 3                          |
| 20 | T                            | 02_08       | 6         | -15.0        | 83.6          | 925            | 54                                      | E                                      | 4                          |
| 21 | T                            | 02_08       | 12        | -15.4        | 84.19         | 925            | 54                                      | SE                                     | 6                          |
| 22 | T                            | 02_08       | 18        | -15.6        | 84.4          | 925            | 54                                      | SE                                     | 4                          |
| 23 | T                            | 02_09       | 0         | -16.1        | 85.0          | 925            | 54                                      | SE                                     | 6                          |
| 24 | T                            | 02_09       | 6         | -16.6        | 85.3          | 925            | 54                                      | SE                                     | 6                          |
| 25 | T                            | 02_09       | 12        | -17.4        | 85.9          | 925            | 54                                      | SE                                     | 8                          |
| 26 | T                            | 02_09       | 18        | -18.3        | 86.3          | 935            | 49                                      | SSE                                    | 9                          |
| 27 | T                            | 02_10       | 0         | -19.3        | 86.5          | 940            | 46                                      | SSE                                    | 10                         |
| 28 | T                            | 02_10       | 6         | -20.3        | 86.7          | 945            | 44                                      | SSE                                    | 10                         |
| 29 | T                            | 02_10       | 12        | -20.8        | 86.5          | 955            | 38                                      | SSW                                    | 8                          |
| 30 | T                            | 02_10       | 18        | -21.4        | 86.7          | 965            | 36                                      | SSE                                    | 7                          |
| 31 | STS                          | 02_11       | 0         | -22.4        | 85.9          | 980            | 28                                      | SW                                     | 10                         |
| 32 | STS                          | 02_11       | 6         | -23.1        | 86.0          | 985            | 26                                      | S                                      | 8                          |
| 33 | TS                           | 02_11       | 12        | -23.7        | 85.7          | 988            | 23                                      | SSW                                    | 7                          |
| 34 | TS                           | 02_11       | 18        | -24.3        | 85.2          | 994            | 18                                      | SW                                     | 8                          |
| 35 | TS                           | 02_12       | 0         | -24.6        | 85.1          | 994            | 18                                      | S                                      | 5                          |
| 36 | TS                           | 02_12       | 6         | -24.8        | 85.2          | 994            | 18                                      | S                                      | 3                          |
| 37 | TD                           | 02_12       | 12        | -24.3        | 84.8          | 1000           | 15                                      | NW                                     | 5                          |
| 38 | TL                           | 02_12       | 21        | -23.1        | 83.9          | 1003           | 8                                       | NW                                     | 6                          |
| 39 | TL                           | 02_20       | 12        | -17.6        | 61.1          | 1000           | 8                                       | -                                      | -                          |
| 40 | TL                           | 02_21       | 0         | -18.1        | 59.8          | 1005           | 11                                      | WSW                                    | 4                          |
| 41 | TD                           | 02_21       | 6         | -18.3        | 59.2          | 1003           | 13                                      | WSW                                    | 6                          |
| 42 | TD                           | 02_21       | 12        | -18.0        | 59.9          | 1002           | 13                                      | ENE                                    | 6                          |
| 43 | TD                           | 02_21       | 18        | -18.2        | 59.9          | 998            | 15                                      | 0                                      | 0                          |
| 44 | TD                           | 02_22       | 0         | -18.4        | 59.7          | 998            | 15                                      | SW                                     | 2                          |
| 45 | TD                           | 02_22       | 12        | -18.9        | 59.0          | 999            | 15                                      | SW                                     | 3                          |
| 46 | TD                           | 02_23       | 0         | -19.3        | 58.1          | 999            | 15                                      | WSW                                    | 5                          |
| 47 | TD                           | 02_23       | 12        | -20.5        | 55.8          | 999            | 15                                      | WSW                                    | 12                         |
| 48 | TD                           | 02_24       | 0         | -22.7        | 54.5          | 1002           | 13                                      | SSW                                    | 11                         |
| 49 | TD                           | 02_24       | 12        | -24.5        | 52.5          | 1002           | 13                                      | SW                                     | 13                         |
| 50 | TL                           | 02_25       | 0         | -26.9        | 51.6          | 1004           | 11                                      | SSW                                    | 10                         |
| 51 | L                            | 02_25       | 12        | -29.7        | 52.3          | 1004           | 8                                       | SSE                                    | 10                         |
| 52 | L                            | 02_26       | 6         | -31.1        | 56.2          | 1002           | 8                                       | ESE                                    | 15                         |

Примечание. ТЦ трансформировался в систему умеренных широт.

\*\* Стадии развития возмущения: TL – первичное тропическое возмущение (замкнутая область низкого приземного давления тропической зоны); TD – тропическая депрессия; TS – тропический шторм; STS – сильный тропический шторм; T – тайфун (ураган); L – область низкого приземного давления умеренных широт. Классификация стадий TL, TD, L дана в соответствии с методологией, принятой и развитой в работе (Покровская, Шарков, 2006).

\*\*\* 1 узел = 0.51 м/с = 1.85 км/ч.

ческой депрессии (рис. 4). Окончательное разрушение новой тропической структуры, включая и сформированную тропической депрессией область водяного пара, происходит благодаря втягиванию их во фронтальную зону средних широт.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Детальный анализ энергетических особенностей ТЦ Hondo в течение его необычной эволюции на основе метода “слияния” по разномасштабным данным спутникового ДЗ показывает, что ТЦ пятой категории Hondo сформировался и развился в акватории Южного Индийского океана в сложных условиях взаимодействия с циркуляционными системами мощного ТЦ Ivan. Источником скрытой теплоты энергии для его функционирования и интенсификации может быть значительная область водяного пара, захваченная ТЦ из тропической зоны с муссонной циркуляцией и заметно превышающая его размеры, стандартно определяемые из данных оптических и ИК-наблюдений. Именно из этой зоны ТЦ может достаточно быстро черпать энергию в виде скрытой теплоты, тогда как механизм испарения с поверхности океана достаточно медленный. Такой механизм “захвата” тропическим циклоном области водяного пара авторы предложили (Шарков и др., 2008а, 2008б) именовать “моделью верблюда”, имея в виду известное свойство жизнедеятельности коренных обитателей пустынь. Таким образом, хорошо известное полухудожественное изображение тела ТЦ (рис. 6а на цветн. вклейках) должно быть существенно дополнено облаком водяного пара, обволакивающего всю облачную массу циклона (рис. 6б на цветн. вклейках).

Однако принципиально новым результатом, полученным в данном исследовании, является обнаружение джетовой структуры поля водяного пара, которая соединяет его область, приуроченную к облачному телу циклона, и центральную экваториальную зону водяного пара во внутритропической зоне конвергенции. Нарушение этой джетовой структуры быстро приводит к диссипации ТЦ. Формирование такой джетовой структуры приводит к повторной интенсификации ТЦ и его пост-тайфунных форм. Интересно отметить, что подобного вида эффект повторной интенсификации был также зафиксирован при эволюции ТЦ в Северной Атлантике при анализе динамики поля микроволнового собственного излучения в диапазоне 22.2 ГГц (линия собственного излучения водяного пара), правда, без восстановления поля интегрального водяного пара и соответственно энергетики процесса (Астафьева, Шарков, 2008). По-видимому, все ТЦ обладают указанным свойством и благодаря этому эффекту (эффекту “захвата”) выбрасывают огромное количество скрытого тепла в средние и высокие ши-

роты, чем и обуславливают свою несомненно кардинальную роль в формировании климатических процессов в земной атмосфере.

Отметим также, что ранее (в 1994 г.) были выполнены попытки (Liu et al., 1994) использования близкой к предложенной в данной работе методологии оценки запаса энергии скрытого тепла водяного пара в областях, приуроченных к телу ТЦ, который, в свою очередь, определялся как совокупность облачных систем определенной структуры. Однако эта методология не привела авторов к положительным результатам, поскольку в их работе была использована традиционная для метеорологической практики схема жесткой пространственной фиксации (радиусом в  $1^\circ$  или  $2^\circ$  от центра циклона) области интегрирования. В случае исследования реальных циклонов, как мы показали, использование такой методологии недопустимо, поскольку сама область интегрального пара испытывает очень сильные пространственно-временные вариации в зависимости от стадии развития циклона.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе исследования эволюции ТЦ в Южном Индийском океане, проведенного по дистанционным данным с использованием модифицированного авторами метода, экспериментально выявлен один из основных энергетических источников его функционирования. По результатам анализа, таковым источником является (как и случае Северного Индийского океана) область водяного пара повышенной интегральной концентрации, захваченной циклоном из тропической зоны с муссонной циркуляцией атмосферы и сохраненной им на протяжении всего этапа его эволюции при помощи подпитки от основной экваториальной области водяного пара через поточные структуры “джеты”. Разрыв питающего джета приводит к быстрой (1–2 сут) и полной диссипации циклона. Однако формирование новых джетов из центральной экваториальной области дало возможность вторичного генезиса практически распавшегося тела ТЦ Hondo и формирования нового тропического образования до уровня тропической депрессии с последующей диссипацией при разрыве питающих его джетов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 09-05-01019-а.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Астафьева Н.М., Шарков Е.А.* Траектория и эволюция урагана Alberto от тропических до средних и средневысоких широт: спутниковая микроволновая радиометрия // Исслед. Земли из космоса. 2008. № 6. С. 60–66.
- Ким Г.А., Шарков Е.А., Покровская И.В.* Эволюция и энергетическая структура тропического циклона Нон-

до по данным оптико-микроволнового спутникового зондирования // 6-ая Всероссийская открытая ежегодная конференция “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”. 10–14 ноября 2008 г. Москва. ИКИ РАН. М.: Электрон. Ресурс, 2008. С. 131.

*Покровская И.В., Шарков Е.А.* Тропические циклоны и тропические возмущения. М.: Полиграф-сервис, 2006. 728 с.

Физический энциклопедический словарь / Гл. ред. А.М. Прохоров. М.: Сов. энциклопедия, 1984. 944 с.

*Шарков Е.А.* Дистанционные исследования атмосферных катастроф // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 1. С. 52–68.

*Шарков Е.А., Ким Г.А., Покровская И.В.* Эволюция и энергетические особенности тропического циклона “GONU” с использованием метода “слияния” разномасштабных дистанционных данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов / Под. ред. Е.А. Лупяна, О.Ю. Лавровой. Вып. 5. Т. 1. М.: Азбука-2000, 2008а. С. 530–538.

*Шарков Е.А., Ким Г.А., Покровская И.В.* Эволюция тропического циклона GONU и его связь с полем интегрального водяного пара в экваториальной области // Исслед. Земли из космоса. 2008б. № 6. С. 25–30.

*Gregg W.* Ocean-Colour Data Merging // Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group. 2007. № 6. IOCCG, Dartmouth, Canada. 68 p.

*Dvorak V.F.* Tropical cyclone intensity analysis using satellite data // NOAA Tech. Rep. NESDIS 11. Washington DC 20233. 1984. 47 p.

*Hoffman R. N.* Controlling Hurricanes // Scientific American. October 2004. P. 68–75.

*Liu G., Curry J.A., Weadon M.* Atmospheric water balance in typhoon Nina as determined from SSM/I satellite data // Meteorol. Atm. Phys. 1994. V. 54. № 2. P. 141–156.

*Sharkov E.A.* Remote Sensing of Tropical Regions. Chichester, N.Y., etc: John Wiley and Sons/ PRAXIS, 1998. 320 p.

*Sharkov E.A.* Global tropical cyclogenesis. L., B., N.Y. etc: Springer / PRAXIS, 2000. 370 p.

*Tremberth K.E., Fasullo J.* Water and energy budgets of hurricanes and implications for climate change // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. № D23107. doi:10.1029/2006JD008304.

## Tropical Cyclone Hondo Evolution in the Equatorial Water Vapor Fields Using Multi Spectral Approach

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

<sup>1</sup>*Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow*

<sup>2</sup>*Scientific Center of Aerospace Monitoring “Aerocosmos”, Moscow*

In the paper, the detailed analysis of tropical cyclone (TC) 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.

**Key words:** tropical cyclones, precipitable water vapor, microwave remote sensing

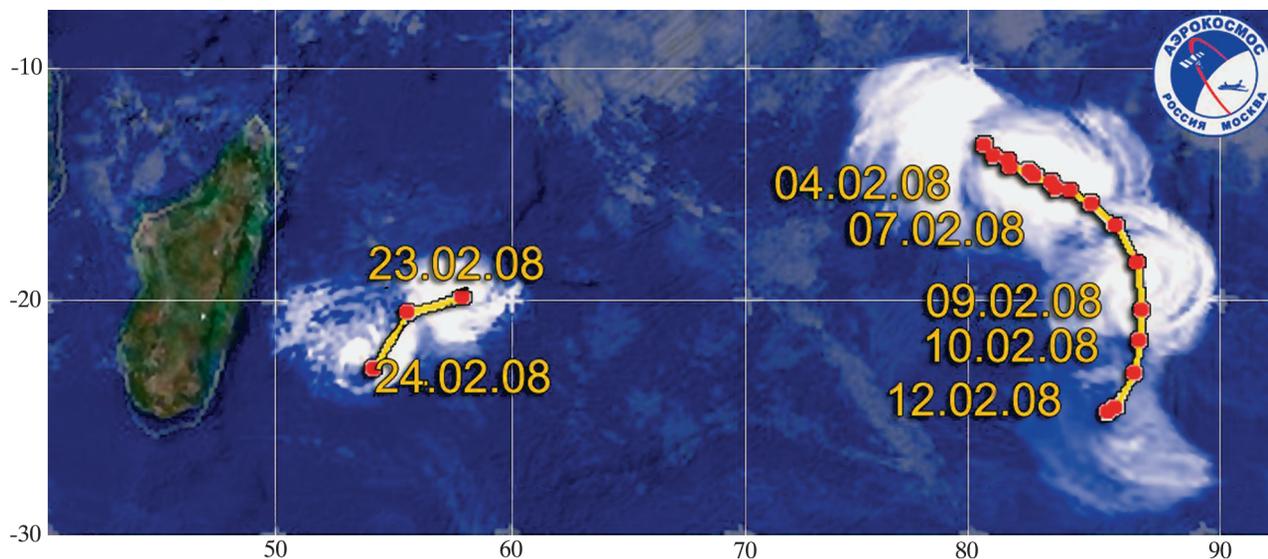


Рис. 1. Траектория ТЦ Hondo, построенная за период с 4 по 12 февраля и с 23 по 24 февраля 2008 г. по данным официальной версии с сайта <http://www.solar.ifa.hawaii.edu>.

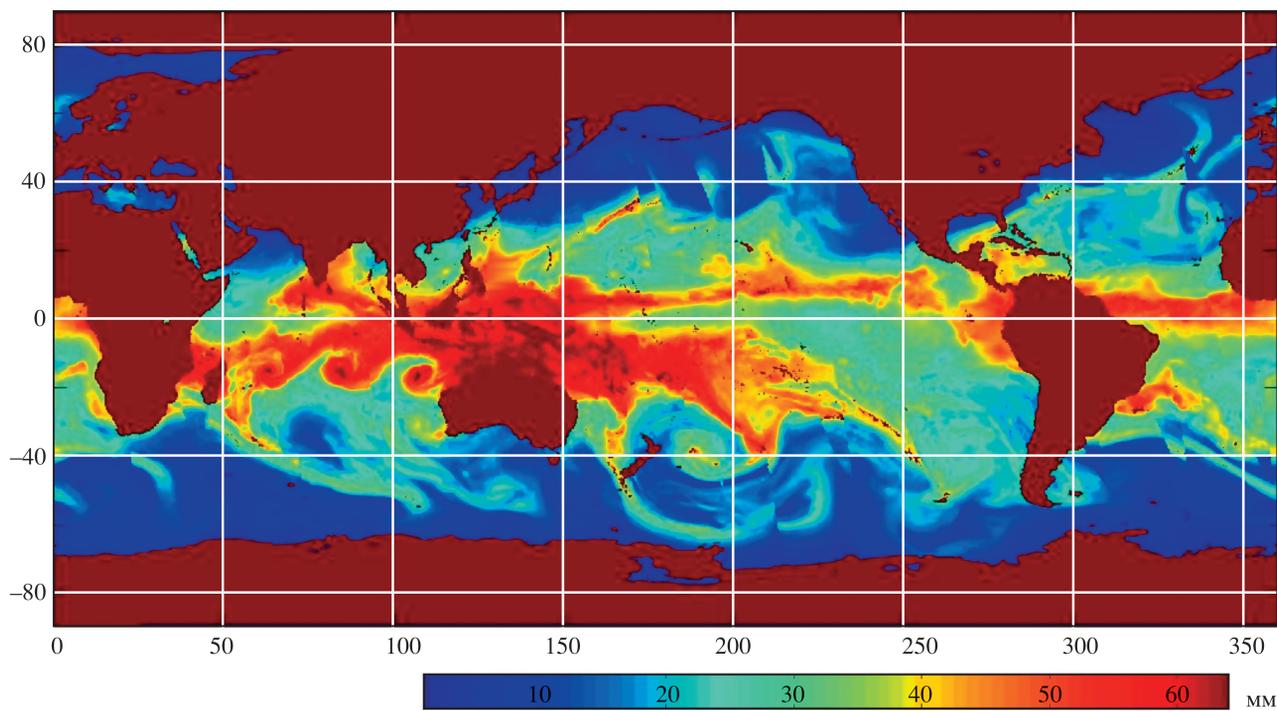
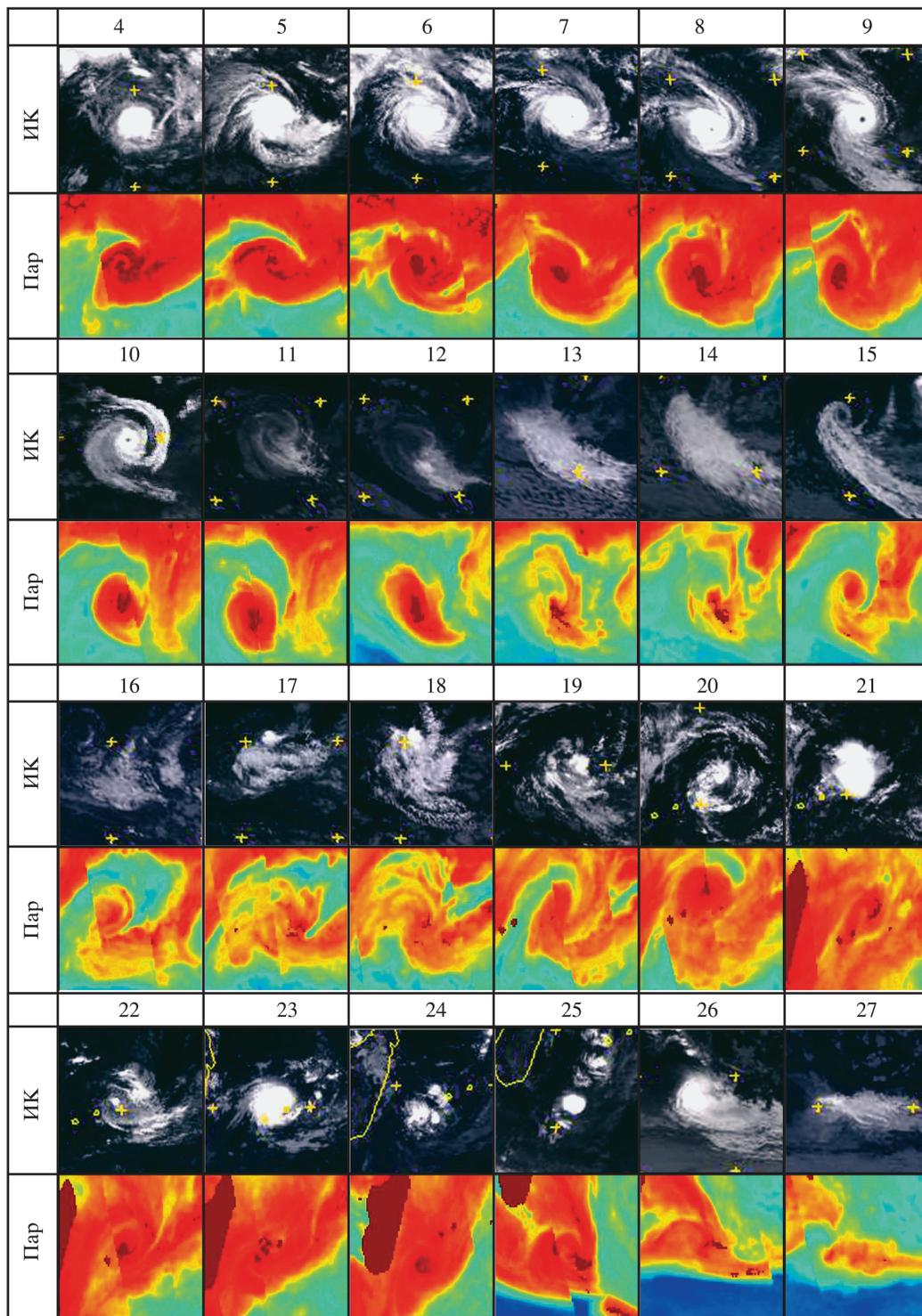


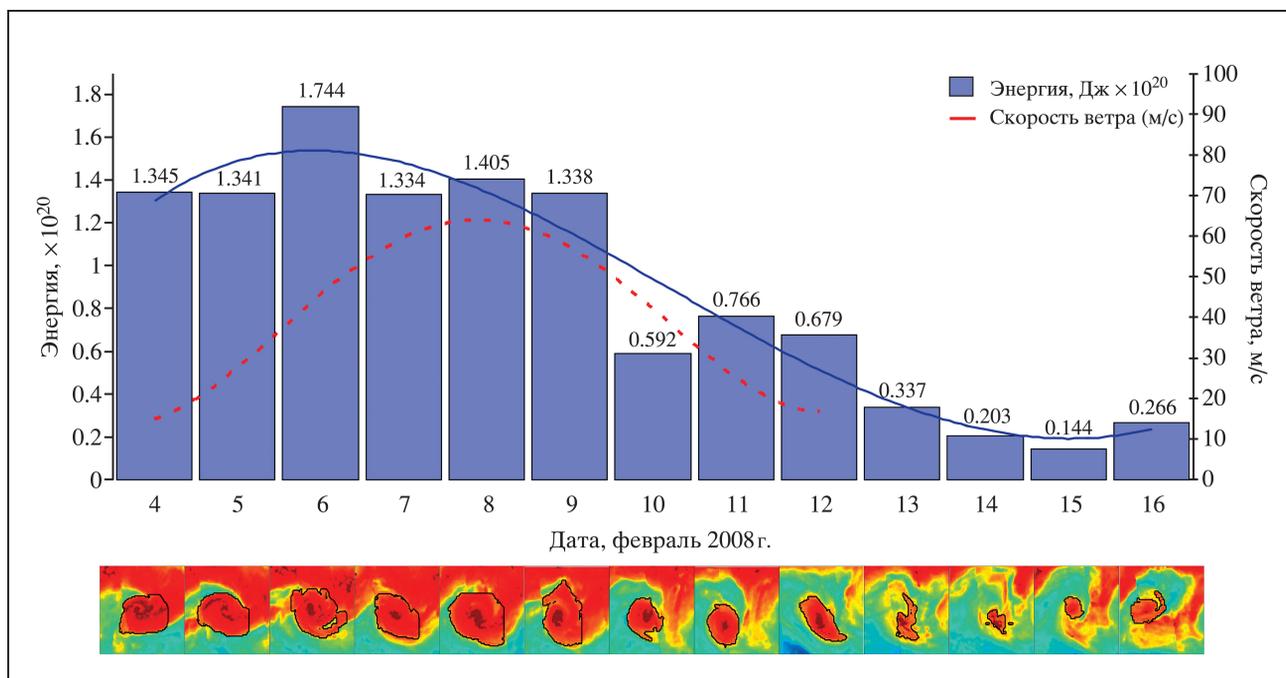
Рис. 3. Глобальное восстановленное поле водяного пара за 8 февраля 2008 г.





**Рис. 4.** Временной ряд композиций (кадров) попарных изображений ИК-канала ИЗС Meteosat-7 и поля интегрального водяного пара, приведенных к одинаковому масштабу и отображающих различные стадии эволюции и трансформации ТЦ Hondo и сопутствующих метеорологических систем за период 04–27 февраля 2008 г. Сроки наблюдения отображены цифрами над изображениями.





**Рис. 5.** Эволюция суточного значения энергии поля водяного пара, сопровождающего тело ТЦ Hondo, и его динамических характеристик за период 04–16 февраля 2008 г. Значения энергии поля водяного пара, проинтегрированные по выбранным площадям, представлены в виде серых прямоугольников. В нижней части рисунка представлена серия изображений поля интегрального водяного пара за этот же срок эволюции ТЦ Hondo. Области площадного интегрирования, по которым были посчитаны значения энергии поля водяного пара, околнурены белыми кривыми. Сплошной линией указана временная аппроксимация энергии поля водяного пара; пунктирной линией – аппроксимация скорости ветра в ТЦ.





**Рис. 6.** Схемы энергообмена в теле ТЦ: *a* – традиционная (Hoffman, 2004); *б* – модифицированная.

