

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

ОБНАРУЖЕНИЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КУПОЛОВ
В ЭКВАТОРИАЛЬНОМ ПОЛЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО ВОДЯНОГО ПАРА
ПРИ ГЕНЕЗИСЕ ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОНА FRANCISCO (2001)

© 2013 г. Е. А. Шарков*, Я. Н. Шрамков, И. В. Покровская

Институт космических исследований РАН, Москва

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

Поступила в редакцию 01.02.2013 г.

С помощью принципиально усовершенствованной комплексной базы данных EVA-01 (пространственно-временная эволюция тропического циклона и поля водяного пара) с элементами объектно-реляционного типа выполнен детальный анализ поля интегральной концентрации водяного пара (по данным микроволновых спутниковых систем комплекса DMSP) на всех этапах временной эволюции тропического циклона (ТЦ) Francisco (2001) в акватории северо-западной части Тихого океана. В работе показано, что при использовании технологии сетчатых 3-D поверхностей были впервые экспериментально получены отдельные детализированные фрагменты поля водяного пара, в которых на фоне среднего значения его интегрального содержания, превышающего критическое значение, формируются своего рода “купола” повышенных значений содержания водяного пара достаточно сложной пространственной формы и с очень высокой временной изменчивостью. Возможным физическим механизмом формирования повышенного значения интегрального содержания водяного пара могут служить известные высотные конвективные колонны в облачном поле ТЦ на каждый временной эволюционный этап преобразования ТЦ.

Ключевые слова: тропические циклоны, интегральное поле водяного пара, критические геофизические параметры генезиса

DOI: 10.7868/S0205961413050096

ВВЕДЕНИЕ

С самого начала активного использования спутниковых методов в метеорологии были потрачены значительные усилия исследователей по наблюдению и регистрации отдельных (и фрагментарных) оптических и ИК-изображений тропических вихревых возмущений в различных фазах, и на их базе сформирован целый спектр оптических и ИК-сигнатур облачных систем, образующих крупномасштабную структуру атмосферной катастрофы – тропического циклона (ТЦ). Эти оптические сигнатуры облачных систем легли в основу распознавания признаков зрелости ТЦ и его динамических характеристик и используются в оперативном анализе по настоящее время (см., например, Минина, 1970, 1982; Шарков, 2010; Dvorak, 1984; Sharkov, 1998, 2000, 2012; Velden et al., 1998). Однако, с точки зрения общей энергетики атмосферной катастрофы, эти признаки являются по существу вторичными и не могут претендовать на ранг первичных признаков “близости” геофизической среды к генезису индивидуального тропического возмущения или к кризисному моменту перехода “слабой”, размы-

той формы в резко интенсивную и развитую форму (т.н. процесс интенсификации ТЦ). В полной мере таких признаков пока не существует, поскольку не ясен источник “быстрой” и мощной энергии, которая позволит интенсифицировать (или диссипировать за счет отбора энергии) ТЦ за сравнительно короткий промежуток времени (5–8 ч). Принципиально новым шагом в изучении дистанционных критериев генезиса ТЦ следует считать результаты комплексных многочастотных оптико-ИК-микроволновых спутниковых исследований эволюции оптического образа ТЦ в поле экваториального интегрального водяного пара, при анализе которых обнаружен фундаментальный вклад малоинерционного источника энергии – поля водяного пара повышенной концентрации, – за счет энергии которого и происходят генезис первичных форм ТЦ и затем формирование зрелых форм ТЦ, и горизонтального переноса водяного пара глобальной циркуляцией и джетовыми потоками для поддержания функционирования зрелых форм ТЦ (Шарков, 2010; Шарков и др., 2010, 2011а, б).

Важно отметить, что при рассмотрении классической концепции генезиса ТЦ (Emanuel, 2003) в вопросах термодинамического баланса (типа “цикла Карно”) взаимодействия тропических возмущений с полями водяного пара вообще не рассматриваются, и по существу уходит из рассмотрения значительная (и может быть и решающая) часть термо-массообмена. Сложность исследуемой проблемы заключается в том, что необходимо провести синхронный анализ дистанционной спутниковой информации двух стохастических процессов, обладающих принципиально различными пространственно-временными масштабными и структурными характеристиками. Первый процесс – эволюция ТЦ как системы облачных масс (Sharkov, 2000, 2012), второй – как особенности пространственного поля интегрального водяного пара со значительной пространственно-временной вариабельностью (Шарков и др., 2010). Сочленение двух указанных баз данных должно быть произведено на минимальном временном интервале (в данном случае – на суточном временном пикселе). В случае же увеличения временного интервала сочленения двух процессов эффективность предлагаемого метода резко падает из-за сравнительно небольшого времени жизни ТЦ и очень высокой пространственно-временной вариабельности поля водяного пара. Анализ методологии построения необходимых для исследуемой задачи баз данных показал (Шрамков и др., 2010), что необходимое временное сочетание параметров двух стохастических процессов возможно при использовании активно развивающейся в настоящее время объектно-реляционной технологии построения сложных комплексных баз данных.

Цель настоящей работы – на основе преимуществ объектно-реляционной базы данных сформировать усовершенствованный вариант базы данных (БД) EVA-01 с элементами объектно-реляционной технологии, которая включает в себя дистанционную спутниковую информацию о двух упомянутых выше стохастических процессах. На основе строго синхронного анализа этих стохастических полей удастся показать, что на фоне среднего значения интегрального содержания поля водяного пара (далее – поля W) образуются своего рода “купола” повышенных значений интенсивностей полей W достаточно сложной пространственной формы. Фиксация по дистанционным микроволновым данным этой особенности поля водяного пара соответствует временным срокам, более ранним, чем появление зрелой эволюционной формы ТЦ по оптическим и ИК-данным (определенная сигнатура облачных систем вихревой структуры ТЦ).

ДАнные НАБЛЮДЕНИЙ, МЕТОДИКА И АЛГОРИТМ ИХ ОБРАБОТКИ

Блок-схема первого варианта БД EVA-00 с элементами объектно-реляционной технологии, которая включает в себя дистанционную спутниковую информацию о двух упомянутых выше стохастических процессах, впервые представлена в работе (Шрамков и др., 2010).

БД EVA-00 использует информацию от своих предшественниц – БД GLOBAL-TC и GLOBAL-RT-FIELDS (Институт космических исследований (ИКИ РАН)). Первая представляет собой хранилище систематизированных дистанционных данных о глобальном тропическом циклогенезе, т.е. содержит информацию о физическом процессе, рассматриваемом на всех акваториях Мирового океана (Покровская, Шарков, 2006, 2011). Каждый вновь образующийся тропический циклон или тропическое возмущение, в дальнейшем не перешедшее в развитую форму ТЦ, составляет в базе данных отдельный файл информации.

БД GLOBAL-RT-FIELDS содержит информацию о глобальных полях радиояркостных температур (Ермаков и др., 2007), полученных с помощью комплекса SSM/I – семиканального радиотеплового прибора, принимающего линейно поляризованное излучение на частотах 19.35; 22.235; 37.0; 85.5 ГГц. На всех частотах, кроме 22.235 ГГц, измеряется как вертикальное, так и горизонтальное поляризованное излучение. На частоте 22.235 ГГц – только вертикальное. Пространственное поле зрения измерений на поверхности Земли составляет 12.5 км для канала 85.5 ГГц и 25 км для других каналов. Для получения информации о содержании водяного пара необходимы данные о радиояркостных температурах на двух каналах 22.235 и 37.0 ГГц. БД EVA-00 представляет собой комплекс программ, который выполняет все необходимые, на данный момент, функции обработки глобальных полей водяного пара и информацию о ТЦ. Прежде всего, происходит последовательная обработка данных из БД GLOBAL-TC с помощью языка программирования Microsoft Visual Studio. Поля радиояркостных температур, полученные на двух частотах – 22.235 и 37.0 ГГц – и заимствованные из БД GLOBAL-RT-FIELDS, обрабатываются на языке программирования IDL с помощью линейного алгоритма обратных задач, представленного в работе (Ruprecht, 1996), по формуле

$$W = 131.95 - 39.50 \ln(280 - T_{22V}) + 12.49 \ln(280 - T_{37V}),$$

где W – значение интегрального водяного пара, в кг/м² (или в мм), в пространственном пикселе разрешения прибора SSM/I; T_{22V} и T_{37V} – значения радиояркостных температур по каналам

22.235 и 37.0 ГГц (вертикальная поляризация) в пространственном пикселе разрешения прибора SSM/I.

В основу обработки и устройства полей водяного пара положен принцип рассмотрения глобальных дистанционных данных как достаточно длинных рядов пространственно-временных наблюдений. Выходные данные могут быть записаны в один или несколько файлов. Наиболее естественный – метод визуализации полученных данных – представляется как формирование серий изображений в виде видеоклипа. Развитие этой методики лежит в русле принятого ранее сотрудниками ИКИ РАН анимационного подхода (Ермаков и др., 2007) к анализу спутниковых дистанционных данных для исследования быстропротекающих атмосферных процессов.

На основе полученной комплексной БД сформирован демонстрационный анимационный ролик, представленный на сайте отдела исследования Земли из космоса ИКИ РАН (http://www.iki.rssi.ru/asp/dep_coll.htm) и наглядно демонстрирующий связь областей повышенной концентрации водяного пара и генезиса тропических циклонов (Шарков и др., 2012).

Однако в связи с тем, что при отображении глобальных участков земной поверхности требуется сбалансированная цветовая схема, отображение высокочастотных (мелкомасштабных) деталей этих изображений в формате “ложных цветов” представляется крайне затруднительным. Для исследования регионов, где требуется более тщательное исследование деталей поля водяного пара, в работе предлагается уменьшение области отображения, с одной стороны, и, с другой, представление его в виде 3D-поверхности. Анализ, проведенный авторами, показал, что наиболее представительными и наглядными для исследуемых проблем оказались сетчатые функции с заданной функциональной закраской ячеек. Также, для более точных количественных данных в точке исследования, каждая поверхность строилась с добавлением каркаса. Это позволяет обнаружить мелкомасштабные структуры в поле интегрального водяного пара и более детально рассмотреть и проанализировать сложную топологию поля. Данные поверхности строились с помощью библиотек фирмы MathSoft, которая известна разработкой своего программного обеспечения MathLab. Стандартная функция `mesh`, принимающая в качестве входящей последовательности двумерный массив данных, выдает дескриптор для объекта класса `Surface`. Шаг сетки для построения сетчатой 3D-поверхности соответствует уровню разрешения исходных данных и составляет 0.5° . В качестве рассматриваемого участка брался квадрат со сторонами 45° (по широте и долготе) с

изображений, содержащих значения полей интегрального водяного пара. Во время прохождения высокочастотного возмущения типа тропического циклона сетчатые 3D-поверхности наглядно демонстрируют области действия ТЦ и зону его влияния на поля водяного пара.

Для распознавания структур в области глобального поля водяного пара использовался модифицированный алгоритм “вращения из семян”. Отличительной особенностью данного алгоритма является предварительное задание точки отсчета для распознавания и объединения структуры. В качестве таких точек отсчета (семян) брались координаты центра ТЦ, на соответствующий момент времени, и создавалась область влияния площадью в один пиксел. Далее происходит последовательное сравнение значений в центральном пикселе с пикселями по всем восьми направлениям, и если разница по модулю не превосходит заранее заданное значение, в зависимости от положения циклона, то происходит присоединение пиксела к выделенной зоне. Также для более точного определения использовалось условие удаленности от центра – оно не должно превышать определенного значения. Далее происходит сравнение незадействованных соседних пикселов с вновь присоединенными пикселями, тем самым расширяется область выделения. При разнице значений больше заданной величины пространство по данному направлению прекращалось, тем самым создавалась граница области влияния. Как только возникает ситуация невозможности присоединения ни одного пиксела, происходит остановка алгоритма.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

В качестве примера продукта анимации локальных полей и использованного авторами алгоритма распознавания детализированных фрагментов на рис. 1, 2 (см. на цветн. вклейке) приведена эволюция поля водяного пара в северо-западной части Тихого океана в присутствии ТЦ Francisco (2001) на различных стадиях его развития и диссипации. Однако, как мы уже отмечали, процедура представления исследуемых полей на этих рисунках принципиально различна. Если на рис. 1 наблюдатель рассматривает ситуацию, находясь строго на условно-восстановленном перпендикуляре к исследуемой двумерной поверхности (т.е. наблюдения в режиме “надир”), то на рис. 2 ситуация принципиально иная: наблюдатель находится под практически настильным углом (около 20°) к наблюдаемой трехмерной картине интенсивности поля W и, таким образом, все особенности рельефа трехмерного поля (холмы, купола, углубления) будут в максимальной степени подчеркиваться (“настильный режим”). Авторы работы

провели предварительные исследования с целью поиска оптимального косоугольного наблюдения, который и представлен на рис. 2.

Основные характеристики ТЦ Francisco (TC Number NWP 0117), функционировавшего в северо-западной части Тихого океана в сентябре 2001 г., представлены в таблице, которая была заимствована из электронной БД GLOBAL-TC и сформирована с использованием методик препроцессинга (Покровская, Шарков, 2006) для исходных (“сырых”) данных, представленных на сайте <http://www.solar.ifa.hawaii.edu>. Систематика ТЦ Francisco представлена в соответствии с методологией, предложенной в работе (Покровская, Шарков, 2006).

Первичное тропическое возмущение ТЦ Francisco было зафиксировано 15 сентября 2001 г. в районе Маршалловых о-вов с координатами 10° с.ш., 171° в.д. и представляло собой размытую, плохо организованную облачную систему. Давление в центре составляло 1007 мбар, скорость приземного ветра колебалась около 5–7 м/с. В течение четырех дней с 15 по 18 сентября 2001 г. возмущение оставалось в первоначальной стадии развития, смещаясь в западно-северо-западном направлении. С течением времени облачный массив постепенно обособлялся, края его оставались размытыми. В течение 19 сентября, достигнув 15° с.ш., возмущение быстро интенсифицировалось и перешло в стадию тропической депрессии, скорость ветра усилилась до 15 м/с, а к 12 ч дня перешло уже в стадию тропического шторма. Давление в центре продолжало падать и достигло 996 мбар, скорость ветра усилилась до 23 м/с (см. рис. 1а). Отметим, что переход от стадии TL (первичное тропическое возмущение) в стадию TS (тропический шторм) осуществился в поле водяного пара значением более 60 кг/м^2 (эта интенсивность соответствует темно-бордовому цвету на рис. 1). Более детальную структуру поля водяного пара в исследуемом режиме наблюдения (“в надири”) не удается получить.

20 сентября 2001 г. к 18:00 ТЦ перешел в стадию сильного тропического шторма, давление в центре упало до 992 мбар, скорость ветра возросла до 31 м/с (см. таблицу). Глубокая конвекция в центре шторма приобрела четкие очертания с характерным изгибом облачных хвостовых полос в южном секторе, к северу хвостовые полосы были выражены слабее. 21 сентября к 12 ч сильный тропический шторм перешел в стадию тайфуна, этот переход произошел в поле водяного пара со значением, превышающим 70 кг/м^2 (см. рис. 1б, в).

В течение 21–24 сентября тайфун усиливался, скорость ветра достигла 51 м/с, давление упало до 945 мбар. По данным оптических спутниковых наблюдений, облачный массив ТЦ представлял собой характерный вид — компактное, небольшое

по размерам центральное ядро и хорошо развитые хвостовые изогнутые облачные полосы в южном и юго-восточном секторах. Отметим, что именно в этот промежуток времени ТЦ формирует собственное (дочернее) поле интегрального водяного пара в виде компактного центрального ядра (соответствующего оптическому образу) с джетовым спиральным мостом между дочерним ядром и материнским полем водяного пара зоны ВЗК (см. рис. 1г, д). Особенно рельефно это видно на рис. 1е. Именно в этот момент (23 сентября), достигнув 27° с.ш. в стадии Т (тайфун), система циркуляции шторма попала под влияние стационарного фронтального раздела, расположенного к востоку от Японии. Скорость смещения шторма возросла до 35 узлов в северном, северо-восточном направлении. Южные хвостовые облачные полосы почти полностью исчезли, но центральное ядро оставалось компактным. Именно в этот момент происходит резкое уменьшение интенсивности водяного пара в джетовой спиральной структуре и практический ее распад (см. рис. 1ж) при сохранении центрального ядра дочернего поля. Продолжая смещаться в северном направлении, 24 сентября в 18:00 тропический шторм трансформировался в систему умеренных широт к востоку от Курильских о-вов (стадия L) (таблица). Рассмотренная эволюция основных стадий ТЦ Francisco полностью соответствует качественной модели “верблюда” при эволюции ТЦ, предложенной в работах (Шарков и др., 2008, 2011а, б, в).

Значительно более детализированная структура поля водяного пара выявляется при уменьшении общей области отображения зоны эволюции ТЦ Francisco и представлении этой зоны в виде 3D-поверхности в качестве сетчатых функций (рис. 2). Рисунок 2 состоит из 11-ти временных фрагментов (с 15.09.2001 г. по 25.09.2001 г.) поля интегрального содержания (далее поля W в мм осажденной воды) водяного пара с суточным временным усреднением и пространственным пикселем 0.5° (около 50 км) в северо-западной части Тихого океана с координатами от 0° до 45° с.ш. и от 135° до 180° в.д. Для большей наглядности и удобства интерпретации интегральное содержание водяного пара представлено, кроме рельефного вида, еще и в виде цветовой гаммы, значения которой показаны на шкале справа сверху полной диаграммы (в количественных значениях от 0 до 80 мм). На каждом фрагменте слева сверху в виде черного провала дугообразной формы представлен о-в Хонсю (Япония), что является артефактом настоящей тематической обработки.

Общий анализ рельефного представления поля W за указанный промежуток времени показывает, что за короткие временные сроки (меньше суток) формируется целая серия высокоэнергетических образований типа своего рода “куполов” и

Эволюция ТЦ Francisco (2001 г.)

TC Number = NWP 0117

TC Name = Francisco

All Points = 35

№	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	09_15	6	10.0	171.0	1007	5	W	10
2	TL	09_16	6	10.0	169.0	1008	5	W	12
3	TL	09_16	15	10.0	169.0	1008	5	0	0
4	TL	09_16	23	12.9	166.8	1004	7	NW	16
5	TL	09_17	6	14.6	167.8	1004	7	NNE	18
6	TL	09_18	6	14.8	163.5	1004	9	WNW	16
7	TL	09_18	12	14.8	163.5	1004	9	0	0
8	TD	09_19	0	15.1	161.5	1006	15	W	10
9	TD	09_19	6	15.0	162.0	1006	15	E	4
10	TS	09_19	12	14.6	161.5	1004	18	SW	7
11	TS	09_19	18	14.9	160.6	998	18	WNW	6
12	TS	09_20	0	15.1	159.8	996	18	WNW	8
13	TS	09_20	6	15.7	158.6	996	18	WNW	11
14	TS	09_20	12	16.7	157.2	996	23	NW	15
15	STS	09_20	18	17.3	155.6	992	28	WNW	9
16	STS	09_21	0	18.4	154.0	992	28	NW	11
17	STS	09_21	6	18.5	152.6	992	31	WNW	13
18	T	09_21	12	19.2	151.6	990	33	NW	12
19	T	09_21	18	20.1	151.6	990	38	NNW	10
20	T	09_22	0	20.9	149.9	985	41	NW	12
21	T	09_22	6	21.4	149.3	975	44	NW	9
22	T	09_22	12	22.6	148.9	970	46	NNW	13
23	T	09_22	18	23.5	148.4	970	46	NNW	10
24	T	09_23	0	24.5	148.1	960	46	NNW	10
25	T	09_23	6	25.5	147.6	950	46	NNW	11
26	T	09_23	12	26.3	147.5	950	51	N	8
27	T	09_23	18	27.2	147.6	950	51	N	9
28	T	09_24	0	28.4	147.8	945	51	N	12
29	T	09_24	6	29.9	148.1	950	49	N	15
30	T	09_24	12	31.4	148.7	955	46	NNE	16
31	L	09_24	18	33.4	148.0	965	36	N	19
32	L	09_25	0	35.3	148.1	970	33	N	19
33	L	09_25	6	37.2	149.4	975	31	NNE	22
34	L	09_25	12	39.6	152.7	980	28	NE	35
35	L	09_25	18	41.9	156.4	984	21	NE	36

Примечание. ТЦ трансформировался в систему умеренных широт.

** Стадии развития возмущения по классификации (Покровская, Шарков, 2006): 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. *** 1 узел = 0.51 м/с = 1.85 км/ч.

“дуг” повышенных значений (80–85 мм) интенсивностей водяного пара достаточно сложной пространственной формы и очень быстро эволюционирующих во времени. Кроме того, анализ поля *W* показывает, что рассматриваемый регион является своего рода переходной зоной между сухими (около 10–20 мм) и холодными воздушными массами выше 45° с.ш. и влажными (55–60 мм) массами материнского поля южнее 25°–30° с.ш. Эти зоны и их пространственно-временное взаимодействие хорошо идентифицируются в рельефном представлении на каждом временном фрагменте рис. 2. Так, на фрагменте рис. 2 от 15.09.2001 г., наряду с большим количеством мелкомасштабных куполов, идентифицируется большая купольная дуга поля *W* с координатами 25° с.ш. и 135° в.д. (западная оконечность дуги) и 30° с.ш. и 145° в.д. (северо-восточная оконечность дуги). Скорее всего, эта дуга представляет собой конечный этап тропического возмущения (ТВ) в стадии TL (NWP 01-54), существовавшего в этой зоне с 13.09.2001 г. по 15.09.2001 г. (по данным работы (Покровская, Шарков, 2006)). В следующие сутки (16.09.2001–17.09.2001 г.) это возмущение окончательно рассыпалось на целый ряд мелкомасштабных куполов, из одного из которых и образуется (17.09.2001–18.09.2001 г.) первичная форма ТЦ Francisco в стадии TL с координатами 15° с.ш. и 169° в.д. К концу суток 18.09.2001 г. ТВ набирает силу и в течение суток 19.09.2001 г. переходит в стадию TD и затем стадии TS (таблица). В течение следующих суток 20.09.2001 г. ТЦ Francisco резко интенсифицируется и достигает стадии STS со скоростью ветра 28 м/с и падением давления до 992 мбар. В следующие сутки 21.09.2001 г. процесс интенсификации ТЦ Francisco продолжается. При этом формируется целая серия джетов. Они идентифицируются на рис. 2 (фрагмент за 21.09.2001 г.) в виде циклонических дуг, исходящих из материнского поля. Скорее всего, благодаря этому механизму ТЦ Francisco переходит в стадию T менее чем за 6 ч со скоростью ветра 33 м/с и давлением 990 мбар. При этом серия джетов объединяется (22.09.2001 г.) в один мощный джет, который и обеспечивает закачку скрытой теплоты и дальнейший быстрый рост интенсивности ТЦ до скорости ветра 51 м/с и давления 945 мбар (23.09.2001 г.). Однако в эти же сутки происходит сложная перестройка структуры джета: дуговая его структура утончается, и величина купола уменьшается (рис. 2 за 23.09.2001 г.). И, следовательно, накачка скрытой энергии уменьшается, и ТЦ функционирует за счет энергии внутреннего собственного дочернего поля водяного пара. В течение 24.09.2001 г. и 25.09.2001 г. массы сухого воздуха начинают активно вторгаться в зону действия ТЦ, окружая его и разрывая остаточный джет с материнским полем, тем самым резкое уменьшение его интенсивности за

12 ч до скорости ветра 21 м/с и повышения давления до 984 мбар. Все эти процессы хорошо идентифицируются на рельефных изображениях рис. 2 на фрагментах за 23.09.2001 г.–25.09.2001 г.

Результаты анализа рельефного представления поля водяного пара, выполненного авторами, позволяют сделать еще один серьезный шаг по направлению выявления скрытой (и по существу запасенной) энергии в куполообразных структурах ТЦ, которая будет практически незамедлительно затрачена на поддержание кинематической структуры ТЦ и на выброс энергии при конденсации водяного пара в жидких и твердых осадках ТЦ. Оценка скрытой в куполообразных структурах ТЦ энергии была выполнена следующим образом: был выбран критерий выделения куполообразных структур ТЦ, которым послужило пороговое значение водяного пара, ниже которого интересующее нас образование долгоживущих ТЦ не происходит (в соответствии с экспериментальными данными (Шарков и др., 2012)). Таким образом, на основании этого критерия выбиралась область интегрирования, по которой производился расчет значения общего содержания пара в зоне выделенного купола. 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 г/см³, массе воды в 10⁶ кг на площади в 1 км². С другой стороны, известно, что удельная теплота фазового перехода пар–вода составляет 2.5 × 10⁶ Дж/кг. Таким образом, при толщине осажденного пара в 1 мм величина скрытой теплоты конденсации составит 2.5 × 10¹² Дж на площади в 1 км². Площадь зоны интегрирования из пикселей, в которых она была представлена в исходном массиве данных, была переведена в квадратные километры, для чего был рассчитан массив перевода площади. В результате всех этих шагов были получены значения энергии скрытой теплоты зоны купола (Дж) на всех стадиях эволюции ТЦ Francisco и представлены на рис. 3.

Эволюция скрытой теплоты куполообразных структур с точки зрения формирования стадий развития ТЦ представляет несомненный интерес. Так, с 15.09.2001 г. по 17.09.2001 г., когда ТЦ находился в стадии TL (первичное тропическое возмущение), купола в зоне действия ТЦ практически не содержали значимого количества скрытого тепла. Однако 18.09.2001 г., в момент, предшествующий переходу ТЦ из стадии TL в стадию TD (тропической депрессии) сроком на 6 ч и затем в стадию TS (тропический шторм) (таблица), скрытое тепло купола резко возросло до значения 2 × 10¹⁹ Дж, что, по-видимому, и послужило энергетическим резервуаром для формирования и устойчивого функционирова-

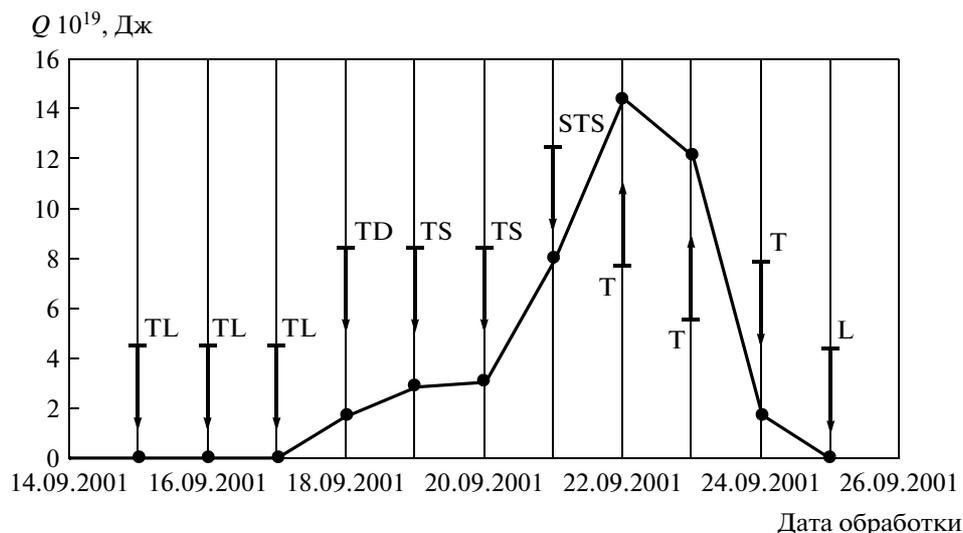


Рис. 3. Временная эволюция скрытой (запасенной) энергии Q ТЦ Francisco в высокоэнергетических куполах по мере трансформации стадий его развития TL, TD, TS, STS, T, L.

ния 19.09.2001 г. и 20.09.2001 г. ТЦ в стадии TS со скоростью ветра 15–18 м/с и давлением 996 мбар. С середины суток 20.09.2001 г. началось резкая интенсификация ТЦ Francisco через стадию STS (сильный тропический шторм) со скоростью ветра 28–31 м/с и давлением 992 мбар до стадии T (тайфун) в середине дня 21.09.2001 г. Скорость ветра достигла 33 м/с, и давление упало до 990 мбар. Со второй половины суток 21.09.2001 г. и весь период суток 22.09.2001 г. интенсивность ТЦ продолжала усиливаться, достигнув скорости ветра в 46 м/с и давления в 970 мбар. В этот же промежуток времени (21.09.2001–22.09.2001 г.) скрытая энергия купольной структуры продолжала резко увеличиваться, достигнув максимума в 1.4×10^{20} Дж (рис. 3). Резкое насыщение водяным паром купольной структуры связано, скорее всего, с тем обстоятельством, что основное тело ТЦ и дочернее поле ТЦ находились непосредственно в зоне действия материнского поля, что давало возможность осуществления своего рода обратной связи между кинематической интенсификацией воздушных масс ТЦ и соответственно падения давления, так и между затоком водяного пара в центральную область ТЦ и соответствующим увеличением водяного пара в купольной структуре. Однако с 23.09.2001 г. начинается новый этап в существовании ТЦ Francisco: его основное тело ТЦ выходит из непосредственного контакта с материнским полем (рис. 1д) и его связь при дальнейшей эволюции осуществляется через достаточно узкую джетовую компоненту, которая по мере движения ТЦ на север становится все более узкой (рис. 1е) и, наконец, достигнув 35° с.ш., начинает стремительно рваться (рис. 1ж). Именно с этим сценарием и происходит диссипационная

эволюция скрытой энергии купольной структуры: достигнув своего максимума 22.09.2001 г., ТЦ выходит из зоны действия материнского поля и вынужден использовать запасенную в купольной структуре энергию на поддержание и даже (временно) на развитие кинематической интенсификации (конец суток 23.09.2001 г. и начало суток 24.09.2001 г.). Скорость ветра достигает 51 м/с, и давление падает до 945 мбар. За 23.09.2001 и 24.09.2001 г. купольная структура “потеряла” около 10^{20} Дж и тем самым исчерпала практически все свои запасы (рис. 3). С начала суток 25.09.2001 г. интенсивность ТЦ Francisco резко падает до стадии L (область низкого приземного давления умеренных широт). За сутки скорость ветра падает с 36 до 21 м/с, и давление увеличивается до 984 мбар. Остатки водяного пара центральной области поглощаются фронтальным потоком с резким увеличением скорости смещения в северо-восточном направлении. На этом ТЦ Francisco прекратил свое существование.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Возможным физическим механизмом формирования повышенного значения интенсивности водяного пара могут служить известные высотные конвективные колонны (“печные трубы”) в облачном поле ТЦ. По мере эволюции ТЦ пространственная форма купола претерпевает серьезные искажения и при диссипации ТЦ перестает существовать. Фиксация по дистанционным микроволновым данным этой особенности поля водяного пара соответствует временным срокам более ранним, чем появление зрелой эволюционной формы ТЦ по данным гидрометеорологиче-

ских наблюдений и наблюдения состояния облачных масс. Таким образом, речь идет, скорее всего, о выявлении принципиально нового критического параметра генезиса ТЦ, а именно, образования куполообразной интенсивности поля W в экваториальном (“материнском”) поле.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью принципиально усовершенствованной комплексной БД EVA-01 (пространственно-временная эволюция тропического циклогенеза и поля водяного пара) с элементами объектно-реляционного типа выполнен детальный анализ поля интегральной концентрации водяного пара (по данным микроволновых спутниковых систем комплекса DMSR) на всех этапах временной эволюции ТЦ Francisco (2001) в акватории Северо-западной части Тихого океана. В работе экспериментально обнаружено, что на фоне среднего значения интенсивности поля водяного пара, превышающего критическое значения (60 мм) интегрального водяного пара (своего рода, это необходимое условие генезиса любого ТЦ, при котором формируется зрелая форма тропического циклона), формируется своего рода “купол” в поле водяного пара. Выявленные связи областей водяного пара повышенной концентрации (купола) и генезиса тропических циклонов стали очевидными только при применении объектно-реляционных компьютерных технологий и библиотек программы MatLab. При использовании технологии сетчатых 3D-поверхностей были получены отдельные детализированные фрагменты поля водяного пара на каждый временной эволюционный этап преобразования ТЦ, начиная с его генезиса — до полного распада и поглощения крупномасштабной фронтальной зоной в Тихом океане. Фиксация по дистанционным микроволновым данным этой особенности поля водяного пара соответствует временным срокам, более ранним (за 1–2 сут), чем появление зрелой эволюционной формы ТЦ по данным гидрометеорологических наблюдений и наблюдения состояния облачных масс.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ермаков Д.М., Раев М.Д., Сулов А.И., Шарков Е.А.* Электронная база многолетних данных глобального радиотеплового поля Земли в контексте многомасштабного исследования системы океан-атмосфера // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 1. С. 7–13.
- Минина Л.С.* Практика нефанализа. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 335 с.
- Минина Л.С.* Тропические циклоны: Руководство по использованию спутниковых данных в анализе и прогнозе погоды / Под ред. И.П. Ветлова, Н.Ф. Вельтишева. Л.: Гидрометеиздат, 1982. С. 253–285.
- 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.
- 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 тропического циклона Goni и его связь с полем интегрального водяного пара в экваториальной области // Исслед. Земли из космоса. 2008. № 6. С. 25–30.
- Шарков Е.А., Ким Г.А., Покровская И.В.* Множественная генерация тропического циклогенеза в Южном Индийском океане // Совр. пробл. дист. зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 3. С. 75–85.
- Шарков Е.А., Ким Г.А., Покровская И.В.* Эволюция тропического циклона Hondo в поле экваториального водяного пара с использованием мультиспектрального подхода // Исслед. Земли из космоса. 2011а. № 1. С. 22–29.
- Шарков Е.А., Ким Г.А., Покровская И.В.* Энергетические особенности множественного тропического циклогенеза по мультиспектральным спутниковым наблюдениям // Исслед. Земли из космоса. 2011б. № 2. С. 18–25.
- Шарков Е.А., Шрамков Я.Н., Покровская И.В.* Особенности экваториального поля водяного пара при эволюции тропического циклона (ТЦ) на примере ТЦ Francisco (2001) // Совр. пробл. дист. зонд. Земли из космоса. 2011в. Т. 8. № 3. С. 310–316.
- Шарков Е.А., Шрамков Я.Н., Покровская И.В.* Повышенное содержание водяного пара в атмосфере тропических широт как необходимое условие генезиса тропических циклонов // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 2. С. 73–82.
- Шрамков Я.Н., Шарков Е.А., Покровская И.В., Раев М.Д.* База данных тропического циклогенеза и глобального поля водяного пара с использованием объектно-реляционных технологий // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 6. С. 52–58.
- Dvorak V.F.* Tropical cyclone intensity analysis using satellite data. NOAA Tech. Report NESDIS 11, 1984. NOAA/NESDIS, Washington, DC. 47 p.
- Ruprecht E.* Atmospheric water vapor and cloud water: an overview // Adv. Space Res. 1996. V. 18. № 7. P. 5–16.
- Sharkov E.A.* Remote sensing of tropical regions. Chichester, N.Y. etc.: John Wiley and Sons/PRAXIS, 1998. 310 p.
- Sharkov E.A.* Global Tropical Cyclogenesis. Berlin, Heidelberg, L., N.Y. etc.: Springer/PRAXIS, 2000. 361 p.
- Sharkov E.A.* Passive Microwave Remote Sensing of the Earth: Physical Foundations. Berlin, Heidelberg, L., N.Y. etc.: Springer/PRAXIS, 2003. 613 p.
- Sharkov E.A.* Global Tropical Cyclogenesis. 2nd Ed. Berlin, Heidelberg, L., N.Y. etc.: Springer/PRAXIS, 2012. 650 p.
- Velden Ch.S., Olander T.L., Zehr R.M.* Development of an Objective to Estimate Tropical Cyclone Intensity from Digital Geostationary Infrared Imagery // Weather and Forecasting. 1998. V. 13. № 13. P. 172–186.

The Detection of High-Energy Domes in the Water Vapor Equatorial Field Under the Tropical Cyclone Francisco (2001) Genesis

E. A. Sharkov, Ya. N. Shramkov, I. V. Pokrovskaya

Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow

The detailed analysis of the interaction between the integral concentration of equatorial water vapor field and Francisco (2001) tropical cyclone in basin of the North-western Pacific Ocean during all stages of TC life using radically advanced data base EVA-01 with elements of the object-relation type. It was experimentally shown that the individual fragment fields of integral water vapor have been obtained using the grid 3D surfaces technology. In this case it was experimentally shown that the “domes” of heightened intensity of water vapor with the intricate space shapes. The possible physical mechanism for forming water vapor domes may be convective columns in TC cloud fields.

Keywords: tropical cyclones, integral water vapor field, boundary geophysical genesis parameters

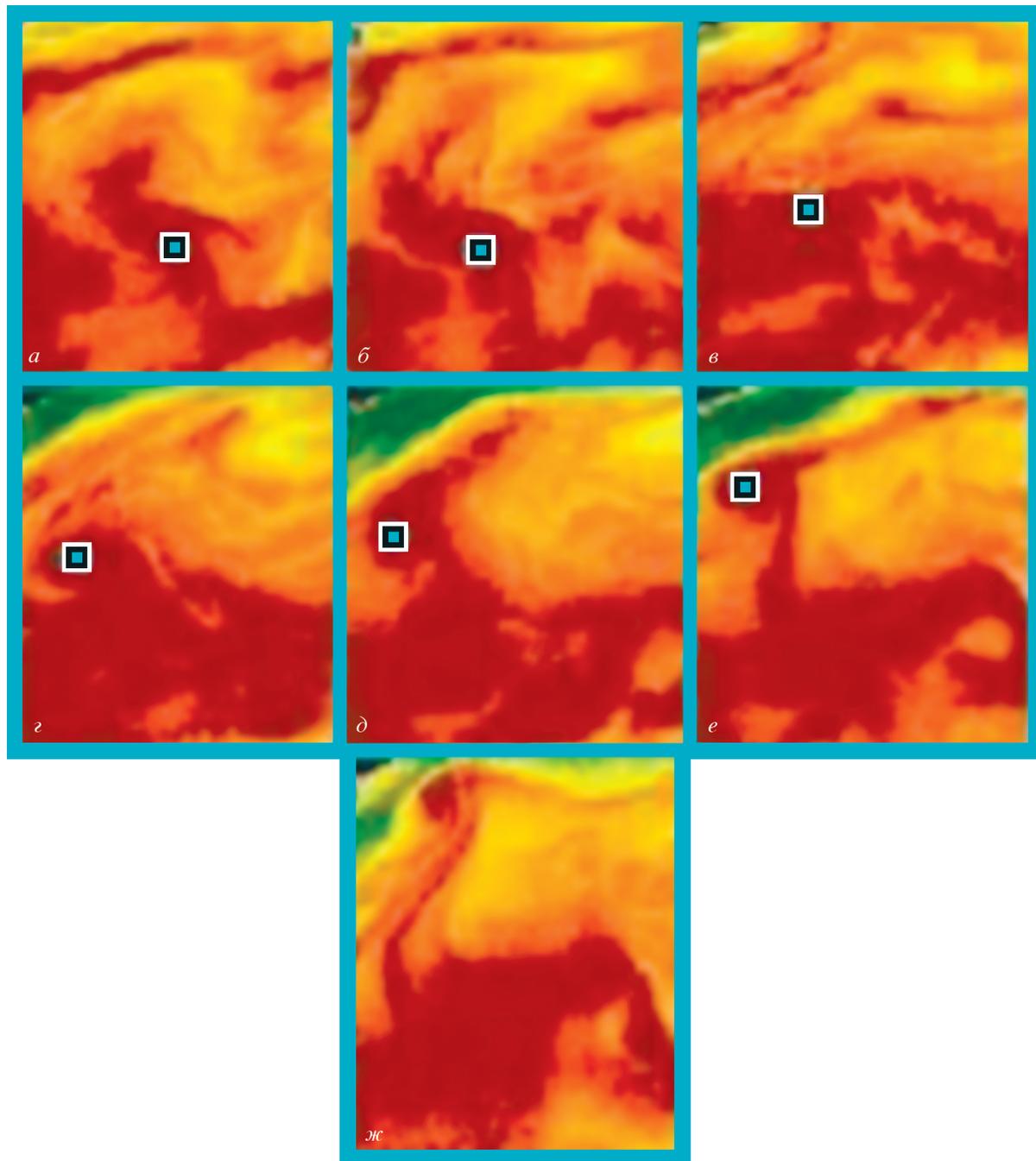


Рис. 1. Временная эволюция поля интегрального водяного пара в северо-западной части Тихого океана в присутствии ТЦ Francisco за 19–25 сентября 2001 г. Центр облачных структур ТЦ обозначается белым квадратом: *a* – 19.09.2001 г.; *б* – 20.09.2001 г.; *в* – 21.09.2001 г.; *г* – 22.09.2001 г.; *д* – 23.09.2001 г.; *е* – 24.09.2001 г.; *ж* – 25.09.2001 г.

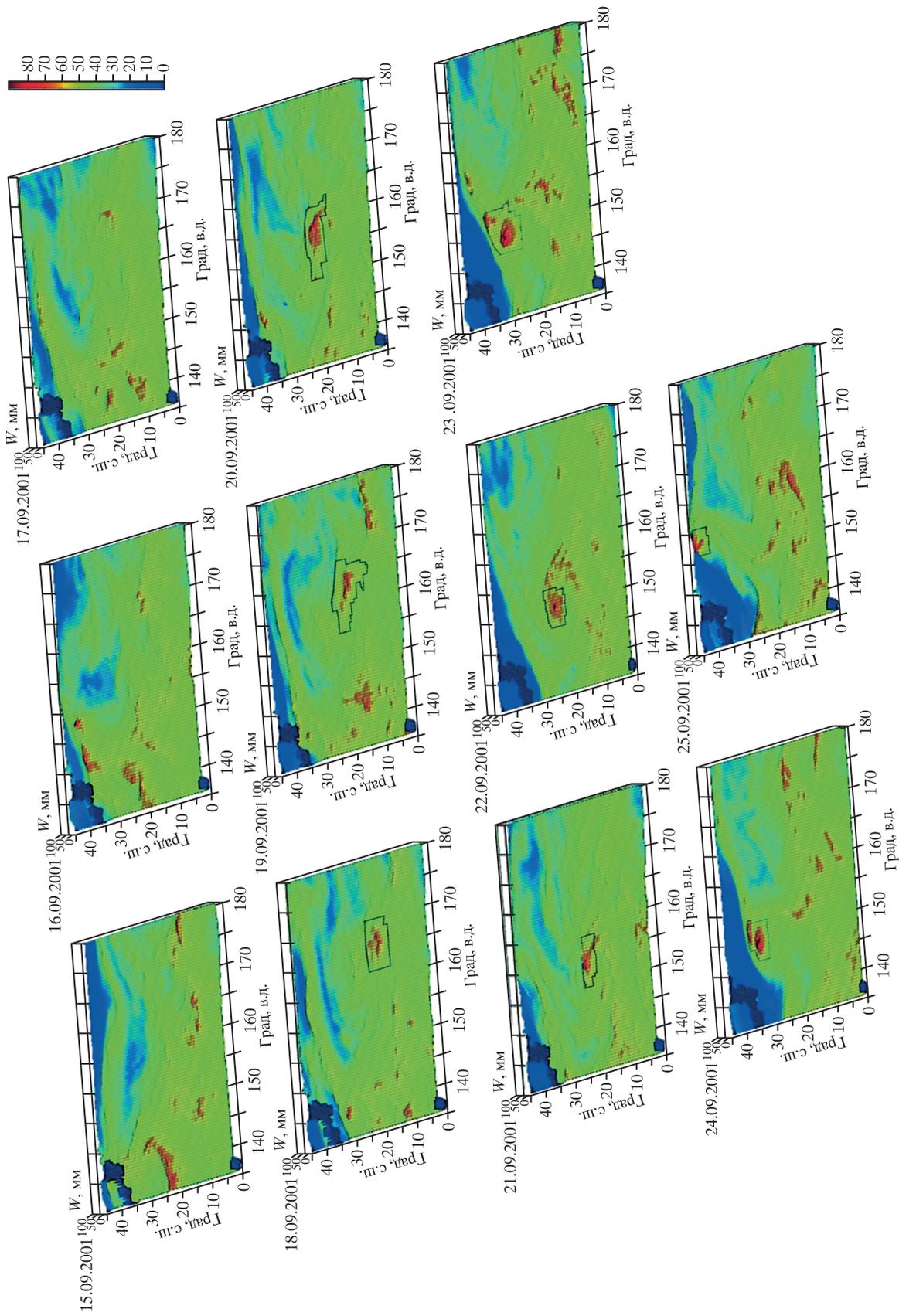


Рис. 2. Временная эволюция поля интегрального водяного пара в северо-западной части Тихого океана в присутствии ТЦ Франсиско за 15–25 сентября 2001 г. в режиме рельефного наблюдения по ежесуточным фрагментам.