
**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА**

ПОИСК ИСТОЧНИКА ЭНЕРГИИ ПРИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЦ KATRINA ПО ДАННЫМ МИКРОВОЛНОВОГО СПУТНИКОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

© 2012 г. Д. М. Ермаков^{1,2*}, А. П. Чернушич¹, Е. А. Шарков², И. В. Покровская²

¹Фрязинский филиал Учреждения Российской академии наук Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино, Московской обл.

²Учреждение Российской академии наук Институт космических исследований РАН, Москва

*E-mail: dima@ire.rssi.ru

Поступила в редакцию 07.11.2011 г.

В настоящей работе рассмотрена возможность применения специализированного подхода для пространственно-временной интерполяции спутниковых данных, учитывающих кинематику многомасштабных процессов при решении задач дистанционного зондирования (ДЗ) быстро протекающих процессов в земной атмосфере. Подход заимствован из интенсивно развивающихся дисциплин технического зрения и компрессии видеоданных. Основными достоинствами обсуждаемого метода являются его замкнутость относительно входных (интерполируемых) спутниковых данных, способность оценивать и учитывать кинематику многомасштабных процессов, сравнительно низкая вычислительная стоимость и простота программно-алгоритмической реализации. На основе разработанного программно-алгоритмического подхода решена задача о “мгновенном” источнике скрытой энергии при интенсификации тропического циклона (ТЦ) Katrina по данным спутниковых радиометров SSM/I миссии DMSP.

Ключевые слова: тропический циклон, интегральное поле водяного пара, критические параметры генезиса; интенсификация

ВВЕДЕНИЕ

Спутниковое дистанционное зондирование (ДЗ) является в настоящее время уникальным средством получения оперативной глобальной информации о климатических процессах на Земле и, в частности, о режиме и текущем состоянии глобального тропического циклогенеза (ГТЦ). Однако, несмотря на несомненный прогресс в исследовании ГТЦ (Sharov, 2000; 2011), показано, что с точки зрения требований, предъявляемых актуальными задачами к детальности и полноте входных данных, спутниковая информация носит в определенной степени фрагментарный характер. Так, отдельному прибору, размещенному на спутнике с солнечно-синхронной орбитой, как правило, требуется несколько суток для полного покрытия Земли измерениями. При этом если задача касается “стационарных” объектов на земной поверхности (например, растительность), то принципиальных проблем для формирования двумерного поля измеряемого параметра практически не возникает. Однако для изучения быстропеременных процессов (например, генезис тропического циклона (ТЦ) или его интенсификация) ситуация принципиально иная. Наблюдательный интервал должен быть существенно сокращен за счет одновременной работы нескольких идентич-

ных приборов на серии спутников, как, например, в случае спутниковых радиометров SSM/I (Ермаков и др., 2007), используемых для восстановления глобальных полей приповерхностного ветра, концентрации водяного пара и других метеорологических параметров. Для анализа механизмов формирования ТЦ или поиска источников и механизмов его интенсификации требуются измерения с частотой несколько (4–8) раз в сутки (Ермаков и др., 2011), и при этом должно обеспечиваться полное покрытие экваториального пояса Земли или, по крайней мере, циклоногенерирующих акваторий Мирового океана. Указанные требования к такой системе наблюдения и мониторинга (высокая частота обзора и полнота пространственного покрытия) плохо совместимы, но необходимость их реализации является принципиальной для задач поиска практически “мгновенных” механизмов и источников энергии для интенсификации атмосферных катастроф. В качестве примера можем указать на печально известный (и много обсуждаемый в научной прессе США и в средствах массовой информации) пример с неожиданной интенсификацией тропического возмущения в стадию тайфуна (ТЦ Katrina) в акватории Мексиканского залива и последующим выходом его на г. Новый Орлеан с катастро-

фическими последствиями. Эта уникальная ситуация (своего рода “загадка” ТЦ Katrina) американскими специалистами уже неоднократно анализировалась с позиций парадигмы стандартной “термо-конвекционной гипотезы”, однако без достижения корректно интерпретируемых физических результатов (Шарков, 2010).

Более того, детальный анализ эволюционных характеристик ГТЦ за двадцатилетний период (Покровская, Шарков, 2006) показывает, что указанный пример отнюдь не является исключительным (как пишет об этом американская пресса), а, наоборот, представляет собой достаточно регулярную картину в эволюции ТЦ.

Цель настоящей работы заключается в применении специализированного подхода для пространственно-временной интерполяции спутниковых данных, учитывающих кинематику многомасштабных процессов при решении задач ДЗ быстро протекающих процессов в земной атмосфере. Подход заимствован из интенсивно развивающихся дисциплин технического зрения и компрессии видеоданных. На основе разработанного программно-алгоритмического подхода решена задача о “мгновенном” источнике скрытой энергии при интенсификации ТЦ Katrina по данным микроволнового спутникового зондирования комплекса SSM/I миссии DMSP (NASA).

ПРОБЛЕМЫ УСВОЕНИЯ БЫСТРОПЕРЕМЕННЫХ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

Поскольку целый ряд глобальных процессов в атмосфере Земли носят в основном характер плавных, относительно медленных изменений, то имеется потенциальная возможность выполнять их качественный анализ и оценку ряда характеристических параметров на основе “достроенных”, т.е. интерполированных по времени и/или в пространстве спутниковых данных, закрывающих “пробелы” в реальных наблюдениях.

В настоящий момент известно два принципиальных подхода к подобному “достраиванию” спутниковых данных. Физически более обоснованным представляется подход, называемый ассимиляцией (или усвоением) данных. В нем промежуточные между измерениями (по времени и/или в пространстве) состояния исследуемой среды рассчитываются как решения системы уравнений, моделирующих физические процессы в этой среде. Данные измерений используются в качестве граничных условий и для уточнения (регуляризации) модельных прогнозов. В зависимости от специфики задачи может применяться модель глобальной циркуляции океана, атмосферы или общей циркуляции, см., например, (Гусев,

2011; Мингалев и др., 2011). К сожалению, несмотря на существенный прогресс в моделировании глобальной циркуляции в океане и атмосфере, вызванный как совершенствованием математического аппарата, так и увеличением быстродействия вычислительных средств, задачу построения универсальной циркуляционной модели системы океан—атмосфера Земли нельзя считать удовлетворительно решенной. Предложен ряд конкурирующих схем, отличающихся способами описания физических процессов и, в частности, способами введения трехмерной системы координат и выбора узловых точек; каждая из них имеет свои достоинства и недостатки, что привело к возникновению “гибридных” моделей, реализующих “переключение” между базовыми схемами в зависимости от результатов текущих расчетов (например, (Bleck, 2002)). Вопрос сравнительного анализа существующих моделей глобальной циркуляции выходит далеко за рамки настоящей работы.

Другой существенной трудностью при реализации ассимиляционного подхода является то, что система модельных уравнений, как правило, содержит неизвестные или известные с низкой точностью параметры, а граничные условия (опорные измерения) сильно зашумлены. При решении таких систем используют сложные оптимизирующие подходы, в частности, основанные на фильтрации Калмана (Kalman, 1960; Rozier et al., 2007). Такие подходы, применяемые для решения систем глобальной циркуляции, в дополнение к указанным выше трудностям сложны в программной реализации и часто предъявляют экстремально высокие требования к ресурсам вычислительной техники (Rozier et al., 2007).

Собственно интерполяционный (в узком смысле) подход во многом лишен указанных выше трудностей, т.е. замкнут относительно входных спутниковых данных и может быть основан на простых вычислительных схемах. Однако “достраивание” данных в отсутствие физически обоснованной модели осуществляется по более формальным математическим критериям, которые выбираются, как правило, из соображений гладкости или непрерывности получаемых решений и слабо обусловлены природой наблюдаемых процессов. Одним из ранних и широко применяемых до сих пор приемов является метод “оптимальной” интерполяции (Гандин, Каган, 1976), реализующий, по сути, линейную интерполяцию в локальной окрестности точек измерения. Такой подход вполне адекватен и эффективен при исследовании изменяющихся, но не перемещающихся по поверхности Земли объектов (например, зон строительства или иного антропогенного воздействия на малые экосистемы), либо при исследовании усредненных по значительным

промежуткам времени величин (например, полей среднемесячных температур поверхности океана). Ясно, однако, что “оптимальная” интерполяция, как и ее нелинейные локальные аналоги (сплайн-интерполяция и др.), не способна адекватно описать кратковременное возмущающее воздействие на локальные области более масштабных динамических процессов (прохождение атмосферных фронтов, ядер циклонов, распространение аэрозольных примесей и т.д.). Информация о таких событиях будет частично или полностью потеряна при локальной интерполяции, если эти события не регистрируются над изучаемой областью в соответствующий момент времени.

В настоящей работе рассмотрена возможность применения альтернативного подхода для пространственно-временной интерполяции спутниковых данных, учитывающего кинематику многомасштабных процессов. Сам подход не является новым, но к настоящему моменту не имеет широкого распространения при решении задач ДЗ и заимствован из интенсивно развивающихся дисциплин технического зрения и компрессии видеоданных. Основными достоинствами обсуждаемого метода являются его замкнутость относительно входных (интерполируемых) спутниковых данных, способность оценивать и учитывать кинематику многомасштабных процессов, сравнительно низкая вычислительная стоимость и простота программно-алгоритмической реализации (по сравнению с фильтрацией Калмана). В работе предложены некоторые модификации исходного метода, а также отмечены возможности привлечения дополнительной информации с целью “регуляризации” получаемых решений.

ОСНОВЫ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ИНТЕРПОЛЯЦИИ ДВУМЕРНЫХ ПОЛЕЙ ДАННЫХ

В задачах технического зрения и обработки видеоданных входную информацию принято представлять в виде последовательности растровых изображений фиксированных размеров, получаемых, как правило, через равные промежутки времени. Каждое такое изображение называется видеокадром или, коротко, кадром, а число кадров, получаемых в единицу времени, — кадровой частотой. Иногда возникает потребность рассматривать некоторые кадры (или их фрагменты) не как независимые, а как связанные с другими кадрами определенным преобразованием, иными словами, представить часть информации не исходными растровыми изображениями, а ссылками на опорные кадры и на соответствующую функцию преобразования.

Разновидность такого представления обеспечивает эффективную компрессию видеоданных в семействе алгоритмов MPEG (Gall, 1991). Возможность его построения обусловлена тем, что интервалы времени между последовательными кадрами в основном значительно меньше характерных масштабов временной корреляции регистрируемых процессов, т.е. наблюдаемые объекты медленно меняют положение, форму, размер и т.д. при переходе от кадра к кадру.

Построение осуществляется с помощью приема, называемого “оценкой движения”. Опорный кадр разбивается на N блоков — небольших квадратных фрагментов равных размеров W на W пикселей, так, чтобы каждый пиксел кадра содержался хотя бы в одном из блоков. Положение i -го блока однозначно определяется парой чисел (x_i, y_i) , задающих расстояние от левого верхнего угла кадра до центра блока в пикселях по горизонтали и вертикали соответственно. Для каждого блока опорного кадра осуществляется поиск “похожего”, т.е. наиболее близкого по некоторой заданной метрике, фрагмента на другом (например, следующем) кадре. Для i -го блока поиск осуществляется в окрестности положения (x_i, y_i) , например, в квадрате размером $3W$ на $3W$ и с центром в (x_i, y_i) . Если наиболее похожий блок найден в положении (x'_i, y'_i) , то i -му блоку опорного кадра ставится в соответствие вектор смещения $m_i = (x'_i - x_i, y'_i - y_i)$. В результате применения этой процедуры ко всем блокам опорного кадра формируется поле векторов M , связывающее попарно блоки опорного кадра с похожими и близкими по положению фрагментами другого кадра.

Подобный прием (как составная часть алгоритма) достаточно эффективен при компрессии видеоданных. Однако можно видеть, что векторы смещений, формирующие поле M , не всегда имеют смысл перемещения объектов в пространстве кадра. Действительно, близость пары блоков по заданной метрике не означает тождественность наблюдаемых объектов, особенно если найденное наилучшее соответствие не является “достаточно” хорошим. Кроме того, может возникнуть проблема выбора ложной цели из равноправных (по критерию близости) альтернатив. Алгоритм оценки движения должен удовлетворять требованиям непрерывности получаемого поля смещений и устойчивости к взаимным смещениям (или деформациям) объектов разных масштабов. С этой целью процедура оценки строится иерархически. Сначала проводится анализ для больших блоков, дающий грубую оценку поля на наиболее крупных масштабах, затем размеры блоков и областей поиска последовательно уменьшаются (причем центры областей поиска смещаются в соответ-

ствии с ранее полученными оценками векторов смещений), обеспечивая все более детальное приближение при сохранении непрерывности M .

С той же целью получения более подробного и точного представления о поле M применяют еще ряд приемов. Так, располагают блоки опорного кадра не “в стык” (чтобы каждый пиксел кадра принадлежал ровно одному блоку), а с наложением друг на друга, сокращая расстояния между центрами блоков вплоть до одного пиксела по каждому направлению. Длины векторов смещений рассчитывают с субпиксельной точностью, предварительно проведя простейшую (например, билинейную) интерполяцию сравниваемых кадров. Если имеется априорная информация об анизотропности объектов или преимущественном направлении их перемещения, блоки и/или области поиска преобразовывают из квадратных в прямоугольные.

Считая, что поле M адекватно описывает перемещения объектов (элементов изображения) за известный интервал времени между парой обработанных кадров, легко вычислить (в линейном приближении) поле скоростей наблюдаемых объектов и оценить их положения в промежуточные моменты времени, т.е. фактически провести временную интерполяцию видеоданных. Такую процедуру иногда называют “компенсацией движения”. Для этого необходимо реализовать операцию действия заданного поля смещений (поля M , помноженного на коэффициент в диапазоне от 0 до 1) на опорный кадр, результатом которой является новый кадр (того же размера, что и опорный) с соответственно смещенными элементами (блоками). Одной из сложностей этой операции является то, блоки опорного кадра после смещения не обязательно будут покрывать всю область нового кадра. Для устранения пропусков доопределяют поле смещения по непрерывности: оценивается средний вектор смещения для блоков, покрывающих окрестность пропуска данных, и находится (или интерполируется) область опорного кадра, которая в результате такого смещения закроет этот пропуск. Наиболее остро эта проблема встает на краях изображения – областях около границ, по одну сторону которых отсутствуют видеоданные. В этом случае описанный выше прием закрытия пропусков может не оправдать себя, и временную интерполяцию таких областей приходится проводить более примитивными средствами, например, методом локальной “оптимальной” интерполяции по времени обрабатываемой пары кадров.

Поскольку за интервал времени между парой интерполируемых кадров наблюдаемые объекты и их части могут не только смещаться, но и менять свои свойства (яркость, относительный кон-

траст), то для повышения точности процедуру компенсации движения часто реализуют симметрично относительно обоих кадров. При этом на более ранний по времени кадр действуют полем, пропорциональным M , а на более поздний – противоположно направленным полем, пропорциональным $-M$ (коэффициенты пропорциональности выбираются в соответствии с интерполируемым моментом времени); результаты двух действий объединяют.

В совокупности приемы оценки и компенсации смещений обеспечивают возможность временной интерполяции видеоданных с учетом динамики многомасштабных процессов. При этом, как видно, существует множество вариантов реализации и настройки такой интерполяции (от назначения размеров и положений блоков до организации иерархической схемы оценки смещений). Построение конкретной реализации, наиболее адекватной цели исследования, является задачей исследователя. Кроме того, классическая схема интерполяции, описанная выше, является линейной по времени. Обоснованное введение нелинейности требует модификации алгоритма. Одной из наиболее существенных проблем описанной схемы являются пропуски (отсутствие) части данных. Регулярно возникает нехватка данных при работе на краях кадра, если в соответствии с принципом непрерывности поля смещений требуется “выйти” за границы изображения. Аналогичная проблема может возникнуть и во внутренних областях кадра, в частности, из-за дефектов или пропусков данных, связанных со сбоями или повышенными шумами при формировании изображения, а также с эффектом “взаимного перекрытия”, связанного с тем, что реальное движение осуществляется в трехмерном пространстве. Хотя формально видеоданные в “проблемных” областях могут присутствовать, их распространение на интерполированные кадры является неоправданным и часто приводит к общему снижению качества интерполяции.

В настоящей работе рассмотрена возможность временной интерполяции данных многоканальных радиометров SSM/I, расположенных на спутниках серии DMSP (<http://dmsp.ngdc.noaa.gov/dmsp.html>). Приборы SSM/I осуществляют измерения радиояркостных температур в семи каналах, различающихся длиной волны и/или поляризацией сигнала. С формальной точки зрения интерполяцию можно выполнить для каждого из каналов измерений независимо. Однако более обоснованным представляется подход, при котором по исходным данным сначала восстанавливается некоторый физический параметр системы океан-атмосфера, а затем проводится интерполяция расчетных полей этой величины. В этом

случае можно использовать априорные сведения о характерных масштабах корреляции процессов, приводящих к изменениям интерполируемых данных, и применить эту информацию для настройки и отладки алгоритма интерполяции.

С точки зрения алгоритма интерполяции кадры видеоданных являются двумерными массивами яркостей точек, образующих регулярную сетку (растр). Спутниковые данные также являются двумерным массивом некоторой величины, например, восстановленного поля атмосферного водяного пара W . Однако исходная сетка измерений (формат данных SWATH) в координатах широт и долгот является нерегулярной и криволинейной, что затрудняет применение стандартных приемов обработки. Поэтому в настоящей работе использованы данные, приведенные к регулярной географической сетке с шагом 0.5° (формат GRID). Таким образом, глобальное распределение водяного пара в атмосфере Земли представлено эквивалентным растровым изображением размерами 720 точек по ширине (долготе) на 360 точек по высоте (широте).

Частота пролета спутника серии DMSP над одним и тем же местом земной поверхности составляет примерно один раз в сутки, поэтому в качестве отправной точки при формировании “кадров” водяного пара имеет смысл взять спутниковые данные, накопленные за одни сутки наблюдений. Эти кадры содержат характерные пропуски данных, “пространственные лакуны”, вызванные тем, что соседние витки орбиты спутника разнесены на расстояние примерно вдвое большее ширины обзора SSM/I на экваторе (рис. 1). Как отмечалось, наличие таких пропусков существенно сказывается на качестве интерполяции, кроме того, эти пропуски не занимают постоянного места на кадре, а медленно смещаются в долготном направлении (примерно на треть ширины) каждые сутки. В связи с этим возникает необходимость привлечения большего объема спутниковых данных для формирования кадра без лакун.

Необходимо рассмотреть две принципиальные возможности. Первая состоит в формировании “однородного” кадра – по данным одного спутникового прибора. К сожалению, в этом случае на формирование кадра без лакун требуются наблюдения в интервале трех суток, который сопоставим со временем жизни ряда важных мезомасштабных атмосферных процессов (см., например, (Sharkov, 2011)). Остается вторая возможность, состоящая в сохранении суточного интервала между кадрами за счет использования данных нескольких приборов SSM/I, работающих одновременно. Так, в 2005 г. одновременно производились наблюдения со спутников F13, F14 и F15 серии DMSP. Объединение данных со всех трех

спутников позволило сформировать “композитные” кадры без пространственных лакун за каждые сутки наблюдений. Пример композитного кадра за 26.08.2005 приведен на рис. 2 (на вклейках с цветн. рис.).

Существенным недостатком композитных кадров является их неоднородность. Один из аспектов этой неоднородности – качество информации, поступающей от разных приборов. В данном случае этой неоднородностью пренебрегали в связи с высокой долговременной стабильностью приборов SSM/I. Другой аспект неоднородности – пространственно-временной. Точки, близко расположенные на композитном кадре, но соответствующие измерениям с разных спутников, отражают состояние атмосферы в моменты времени, отстоящие друг от друга на несколько часов. В результате изучаемые гладкие процессы могут претерпевать резкие пространственно-временные разрывы на композитных кадрах. При интерполяции в первом приближении такие разрывы игнорируются, затем предпринимается попытка частичной компенсации этих разрывов за счет “сдвигов” отдельных областей кадров по времени. Обсуждаются и другие возможности уменьшения эффекта неоднородности композитных кадров.

ДАнные НАБЛЮДЕНИЙ И МЕТОДИКА ИХ ОБРАБОТКИ

В работе использована информация баз данных GLOBAL-TC и GLOBAL-FIELDS (ИКИ РАН) с элементами тематической обработки. Первая представляет собой хранилище систематизированных данных ДЗ о глобальном тропическом циклогенезе, т.е. содержит информацию о физическом процессе, рассматриваемом на всех акваториях Мирового океана (Покровская, Шарков, 2006). Информация в ней была систематизирована по отдельным регионам, в каждом из которых проведены временная и пространственная привязки, были проверены правильность и полнота сообщений, связанных с характерными климатическими особенностями каждого региона, проведен препроцессинг поступающей сырой информации. Каждый вновь образующийся ТЦ или тропическое возмущение, в дальнейшем не перешедшее в развитую форму ТЦ, составляет в базе данных отдельный файл информации. Таблица для ТЦ Katrina сформирована на основе базы данных GLOBAL-TC за 2005 г. ТЦ Katrina зародился 23 августа 2005 г. в районе Багамских островов и представлял собой размытую облачную систему с отдельными плотными кластерами мощно-кучевых облаков, скорость ветра была 5–10 м/с, давление на уровне моря составляло 1008 мб. В

Эволюция ТЦ Katrina (2005)

Номер ТЦ = ATL 0511			Имя ТЦ = KATRINA					Всего точек = 38	
№	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	08_23	9	25.0	-73.0	1008	5	W	10
2	TL	08_23	15	25.0	-74.0	1009	11	E	10
3	TD	08_23	21	23.2	-75.5	1007	15	SW	12
4	TD	08_24	3	23.4	-76.0	1007	15	WNW	6
5	TD	08_24	9	24.0	-76.4	1006	15	NW	6
6	TS	08_24	15	24.7	-76.7	1006	18	NNW	7
7	TS	08_24	21	25.6	-77.2	1002	21	NW	8
8	TS	08_25	3	26.0	-78.0	1001	23	WNW	7
9	TS	08_25	9	26.2	-78.7	1000	23	W	7
10	STS	08_25	15	26.2	-79.3	997	26	W	5
11	T	08_25	21	26.1	-79.9	985	33	W	5
12	T	08_26	3	25.5	-80.7	984	33	SW	7
13	T	08_26	9	25.3	-81.5	987	33	W	4
14	T	08_26	15	25.1	-82.2	981	33	W	6
15	T	08_26	16	25.1	-82.2	971	44	0	0
16	T	08_26	21	24.8	-82.9	965	44	WSW	7
17	T	08_27	3	24.6	-83.6	965	46	WSW	7
18	T	08_27	9	24.4	-84.4	945	51	WSW	6
19	T	08_27	15	24.5	-85.0	940	51	S	6
20	T	08_27	21	24.6	-85.6	945	51	S	6
21	T	08_28	3	25.0	-86.2	939	51	WNW	6
22	T	08_28	6	25.1	-86.8	935	65	WNW	7
23	T	08_28	9	25.4	-87.4	935	65	WNW	9
24	T	08_28	12	25.7	-87.7	908	73	WNW	10
25	T	08_28	15	26.0	-88.1	907	78	WNW	10
26	T	08_28	21	26.9	-89.0	902	76	NW	11
27	T	08_29	3	27.6	-89.4	904	73	NNW	9
28	T	08_29	9	28.8	-89.6	915	69	N	13
29	T	08_29	15	30.2	-89.6	927	57	N	14
30	T	08_29	21	31.9	-89.6	960	33	N	16
31	STS	08_30	3	33.5	-88.5	973	26	NNE	10
32	TS	08_30	9	34.7	-88.4	981	23	N	16
33	TD	08_30	15	36.3	-87.5	985	15	NNE	18
34	TL	08_31	10	40.0	-71.0	991	13	ENE	25
35	L	08_31	20	42.2	-75.4	997	11	ENE	35
36	L	09_01	4	47.0	-72.0	991	11	NNE	20
37	L	09_02	4	54.0	-69.0	985	11	NNE	20
38	L	09_03	4	57.0	-63.0	986	7	ENE	20

* 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.

течение 23–25 августа возмущение быстро усиливалось, смещаясь вдоль территории Багамских островов, и, подойдя к побережью Флориды, достигло силы урагана, давление в центре упало до 985 мб, скорость ветра возросла до 33 м/с. Пройдя над территорией Флориды, ураган сместился на акваторию Мексиканского залива, произошли опять очень быстрое усиление скорости ветра и резкое падение приземного давления. Максимальной стадии развития ураган достиг на траверсе Нового Орлеана, давление упало до 902 мб, скорость ветра возросла до 76–78 м/с (пятая – наивысшая – категория шкалы Саффир–Симпсон), размер облачного диска составлял 435 миль в диаметре. Сменив направление смещения с запад-северо-западного на северное, 29 августа ураган достиг побережья США (г. Новый Орлеан), прошел над его территорией и к началу сентября достиг территории п-ова Лабрадор, где и разрушился. Материальный ущерб от урагана составил (по предварительным оценкам) 89.6 млрд долларов США.

База данных GLOBAL-FIELDS содержит информацию о глобальных полях радиоярких температур (Ермаков и др., 2007), полученных с помощью микроволнового комплекса SSM/I – семиканального радиотеплового прибора, принимающего линейно поляризованное излучение на частотах 19.35, 22.235, 37.0, и 85.5 ГГц. На всех частотах, кроме 22.235 ГГц, измеряется как вертикально, так и горизонтально поляризованное излучение. На 22.235 ГГц – только вертикально поляризованное. 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 радиоярких температурах на двух каналах 22.235 и 37.0 ГГц.

Поля радиоярких температур, полученные на двух частотах 22.235 и 37.0 ГГц, заимствованные из базы данных GLOBAL-FIELDS, обработаны с помощью линейного алгоритма, 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 $\text{кг}/\text{м}^2$ (или в мм) в пространственном пикселе разрешения прибора SSM/I; T_{22V} и T_{37V} – значения радиоярких температур по каналам 22.235 и 37.0 ГГц (вертикальная поляризация) в пространственном пикселе разрешения прибора SSM/I. Специальная валидация, выполненная в этой работе между восстановленными значениями водяного пара и измеренными по данным радиозондирования (250 профилей) в различных морских

акваториях Атлантического океана и с разновременностью измерений между спутниками и радиозондами лучше, чем два часа, показала, что среднеквадратичное отклонение результатов составляет около $2.58 \text{ кг}/\text{м}^2$. В результате получают глобальные поля водяного пара только над акваториями Мирового океана, которые и участвуют в дальнейшей обработке.

В основу обработки и анализа полей водяного пара положен принцип рассмотрения глобальных дистанционных данных как длинных рядов пространственно-временных наблюдений. При этом длительная последовательность полей водяного пара рассматривается не как механическое объединение данных из нескольких файлов, соответствующих моментам съемки, а является, с точки зрения пользователя, основной структурной единицей базы данных, генерируемой по запросу и позволяющей применение к себе дальнейших операций обработки. Выходные данные могут быть записаны в один или несколько файлов. Наиболее естественным методом визуализации полученных данных представляется формирование серий последовательных изображений (видеоклипа).

На основе полученной комплексной базы данных сформирован демонстрационный анимационный ролик, представленный на сайте отдела Исследование 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 ТЦ. Отметим при этом, что содержание водяного пара не представлено на материках в виду сложности решения обратной задачи над континентами.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

В качестве примера продуктов настоящей системы обработки приведем примеры фрагментов анимации глобального поля водяного пара и поля тропического циклогенеза в период эволюции ТЦ Katrina (23.08.2005–03.09.2005). На рис. 1 представлено глобальное поле интегрального водяного пара на акваториях Мирового океана за 26.08.2005, по данным измерений SSM/I на восходящих витках одного спутника DMSP F13. Цветовая схема интенсивностей водяного пара представлена внизу рисунка, при этом максимальным значениям концентрации водяного пара соответствуют багровые области. Данные изображения получены с дискретизацией раз в сутки. Специальным белым прямоугольником выделена область, пройденная ТЦ Katrina за суточный период 26.08.2005. Отметим, что именно эти сутки были началом резкого перелома в эволюции ТЦ Katrina (таблица). Как видно, прямо-

угольник полностью попадает в зону лакуны (черный цвет). На рис. 2 представлено глобальное поле водяного пара за эти же сутки, построенное по композиционной схеме (простое наложение данных на общий кадр) по данным измерений приборов SSM/I со всех трех спутников миссии DMSP. Как и на рис. 1, специальным белым прямоугольником выделена та же область, пройденная ТЦ Katrina за суточный период 26.08.2005. Теперь область, пройденная ТЦ Katrina, покрыта спутниковыми наблюдениями, которые, однако, разнородны и не согласованы по времени. На основе полученной картины можно делать только самые общие выводы об эволюции и развитии ТЦ (в случае же использования данных с одного спутника, рис. 1, сделать какие-либо физические выводы вообще невозможно). Существует принципиальная возможность для извлечения более детальной информации из имеющихся спутниковых данных с применением описанного выше интерполяционного подхода.

В качестве иллюстрирующего примера рассмотрим результат временной интерполяции композитных кадров глобального поля водяного пара, построенного по данным SSM/I в интервале 23 августа–3 сентября 2005 г., в период развития и активности ТЦ Katrina (см. (Покровская, Шарков, 2006)). Интерполяция была проведена с трехчасовым шагом по времени. Затем были отобраны кадры, наиболее близкие по времени к имеющимся записям базы данных GLOBAL-TC (таблица), из этих кадров вырезаны прямоугольные (в проекции Меркатора) фрагменты, покрывающие область северо-западной Атлантики (60° с.ш.– 15° ю.ш., 100° в.д.– 25° в.д.), затронутой действием ТЦ Katrina. Эти фрагменты собраны на рис. 3 (на вклейках с цветн. рис.). В верхнем углу каждого фрагмента помещена метка времени (по Гринвичу). Белый квадрат указывает положение ТЦ Katrina согласно GLOBAL-TC (Покровская, Шарков, 2006). В нижней части рисунка приведена шкала концентрации водяного пара, значения даны в $\text{кг}/\text{м}^2$.

Как видно, интерполированные кадры дают принципиально новую картину эволюции ТЦ Katrina и адекватно отражают динамику состояния рассматриваемой области. Характерная область повышенной концентрации водяного пара возникает, перемещается и распадается в соответствии с фазами зарождения, движения и ухода в высокие широты ТЦ Katrina – модель “верблюда” (Шарков и др., 2011а; 2011б). При этом следует отметить, что резкое нарастание интенсивности ТЦ начинается вечером (по Гринвичу) 26 августа в связи с образованием мощной области водяного пара (с интенсивностью $70\text{--}80 \text{ кг}/\text{м}^2$). Скорее всего, именно эта область и явилась тем

источником скрытой теплоты, которая была переброшена в резко усилившуюся кинематику ТЦ. Отдельные “рассогласования” по времени (опережение или запаздывание пятна по сравнению с данными GLOBAL-TC) можно объяснить обсужденными ранее причинами, главная из которых – недостаточность линейного приближения и необходимость введения нелинейности, а также необходимость более точной коррекции “временных разрывов”, возникающих на опорных композитных изображениях. Аналогичный эффект образования высокоэнергетического купола в поле водяного пара в момент интенсификации ТЦ был обнаружен ранее (Шарков и др., 2011в) при анализе эволюции ТЦ Francisco (2001).

Для количественной оценки соотношения между энергиями скрытого тепла в атмосфере над Мексиканским заливом и энергетического купола над областью ТЦ были рассчитаны временные ряды двух величин, Q и Q_K , по приведенным выше интерполированным кадрам. Величина Q характеризовала интегральное содержание водяного пара (в пересчете в скрытое тепло) северной части Мексиканского залива, ограниченной 32° с.ш., 100° з.д.; 23° с.ш., 82° з.д. Величина Q_K давала интегральное содержание водяного пара (также пересчитанное в скрытое тепло) для небольшой области (радиусом 3.5°) пикового содержания водяного пара, ассоциированной с развивающимся и перемещающимся ТЦ Katrina. На каждом интерполированном кадре осуществлялся поиск точного положения этой области в окрестности зарегистрированного в GLOBAL-TC положения глаза ТЦ Katrina. На каждом кадре использовалась область, расчет внутри которой обеспечивал Q_K локально максимальное значение. В результате были построены временные ряды Q (в интервале с 23.08.2005 по 03.09.2005 через 6 час.) и Q_K (в интервале с 23.08.2005 по 30.08.2005). Расчетные ряды приведены на общем графике (рис. 4). Анализ рис. 4 показывает, что количество общей энергии скрытой теплоты в атмосфере над Мексиканским заливом жестко коррелирует с энергией купола над ТЦ Katrina. При этом следует отметить, что при переходе барического поля ТЦ (в стадии Т) из Атлантического океана в Мексиканский залив к середине дня (по Гринвичу) 27.08.2005 произошло формирование максимального значения энергии купола (рис. 4) при помощи объединения разрозненных областей поля водяного пара в единую систему (рис. 3). К середине следующего дня 28.08 часть этой энергии порядка 6×10^{18} Дж преобразуется в кинематическую составляющую ТЦ, и максимальная скорость ветра в стене глаза ТЦ достигает $78 \text{ м}/\text{с}$ (таблица). Именно с этой кинематической энергией ТЦ Katrina выходит в ночь на 29.08.2005 на побережье Мексиканского залива в

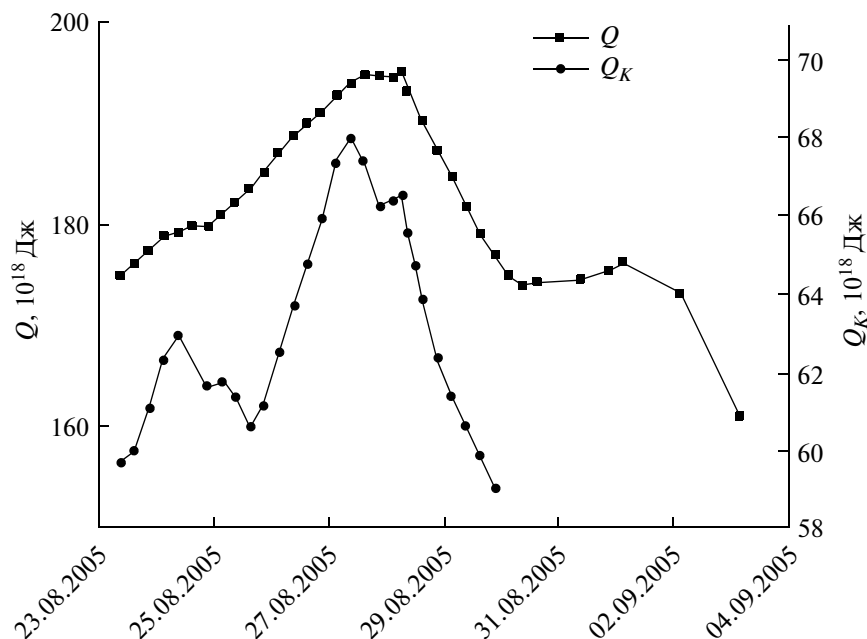


Рис. 4. Временной ход Q и Q_K в период 23.08.2005–03.09.2005. Значения Q отложены по левой шкале, значения Q_K — по правой.

окрестностях г. Новый Орлеан, производя серьезные разрушения. Однако через сутки с утра 30.08.2005 энергия купола резко падает, а он сам распадается (рис. 3). И уже к середине дня ТЦ заполняется и превращается в стадию TD (таблица).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе развит специализированный подход для пространственно-временной интерполяции спутниковых данных, учитывающий кинематику многомасштабных процессов при решении задач ДЗ быстро протекающих процессов в земной атмосфере. Основными достоинствами обсуждаемого подхода является его замкнутость относительно входных (интерполируемых) спутниковых данных, способность оценивать и учитывать кинематику многомасштабных процессов, сравнительно низкая вычислительная стоимость и простота программно-алгоритмической реализации. На основе разработанного программно-алгоритмического подхода решена задача о “мгновенном” источнике скрытой энергии при интенсификации ТЦ Katrina по данным микроволнового спутникового зондирования комплекса SSM/I миссии DMSP.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ватолин Д., Ратушняк А., Смирнов М., Юкин В. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео. М.: Диалог-МИФИ, 2003. 384 с.

Гандин Л.С., Каган Р.Л. Статистические методы интерпретации метеорологических данных. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 360 с.

Гусев А.В. Численная модель гидродинамики океана в криволинейных координатах для воспроизведения циркуляции мирового океана // Вычислительные технологии в естественных науках: Системы глобального масштаба / Под ред. Назиров Р.Р., Щур Л.Н. 2011. Вып. 5. С. 30–48.

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.

Ермаков Д.М., Чернушич А.П., Шарков Е.А., Шрамков Я.Н. Возможности построения краткосрочных глобальных радиотепловых изображений системы океан–атмосфера на базе программной платформы Stream Handler // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 3. С. 9–16.

Мингалева И.В., Мингалева О.В., Мингалева В.С. Численное исследование влияния горизонтальной неоднородности температуры и несферичности Земли на глобальную циркуляцию средней атмосферы // Вычислительные технологии в естественных науках: Системы глобального масштаба / Под ред. Назиров Р.Р., Щур Л.Н. 2011. Вып. 5. С. 65–78.

Покровская И.В., Шарков Е.А. Тропические циклоны и тропические возмущения Мирового океана: хронология и эволюция. Верс. 3.1. (1983–2005). М.: Полиграфсервис, 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 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) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011в. Т. 8. № 3. С. 310–316.
- Bleck R.* An oceanic general circulation model framed in hybrid isopycnic-Cartesian coordinates // Ocean modeling. 2002. V. 37. P. 55–88.
- Gall, Le D.* MPEG: a video compression standard for multimedia applications // Interactions of the ACM. 1991. V. 34. № 4. P. 47–58.
- Kalman R.E.* A new approach to linear filtering and prediction problems // Trans. ASME, J. Basic Engin. 1960. V. 82. P. 34–45.
- Jazwinski A.H.* Stochastic processes and filtering theory. L., N.Y.: Academic Press, 1970. 390 p.
- Rozier D., Birol F., Cosme E., Brasseur P., Brankart J.M., Verron J.* A reduced-order Kalman filter for data assimilation in physical oceanography // SIAM Rev. 2007. V. 49. № 3. P. 449–465.
- Ruprecht E.* Atmospheric water vapour 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.* Global Tropical Cyclogenesis. The 2nd Edition. Berlin, Heidelberg, L., N.Y. etc.: Springer/PRAXIS, 2011. 650 p.
- Shumway R.H., Stoffer D.S.* An approach to time series smoothing and forecasting using the EM algorithm // J. Time Ser. Analysis. 1982. V. 3. № 4. P. 253–264.

Search for an Energy Source for the Intensification of TC Katrina by Microwave Satellite Data

D. M. Ermakov^{1,2}, A. P. Chernushich¹, E. A. Sharkov², I. V. Pokrovskaya²

¹ *Institute of Radioengineering and Electronics, Russian Academy of Sciences, Fryazino, Moscow Region*

² *Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow*

In this paper considered is the possibility of using a specialized approach for spatiotemporal interpolation of satellite data, which takes into account the kinematics of multi-scale processes, in solving problems of remote sensing of fast processes occurring in Earth's atmosphere. Approach is borrowed from the rapidly developing disciplines of computer vision and compression of video data. The main advantages of the method being discussed is that it is closed with respect to the input satellite data, the ability to evaluate and consider the kinematics of multi-scale processes, the relatively low computational cost and ease of software and algorithmic implementation. Based on the developed software and algorithmic approach the problem of "instant" source of latent energy in the intensification of TC Katrina has been solved with the use of data of microwave satellite multichannel radiometer SSM/I, DMSP mission.

Keywords: tropical cyclone, an integral field of water vapor, the critical parameters of the genesis, intensification

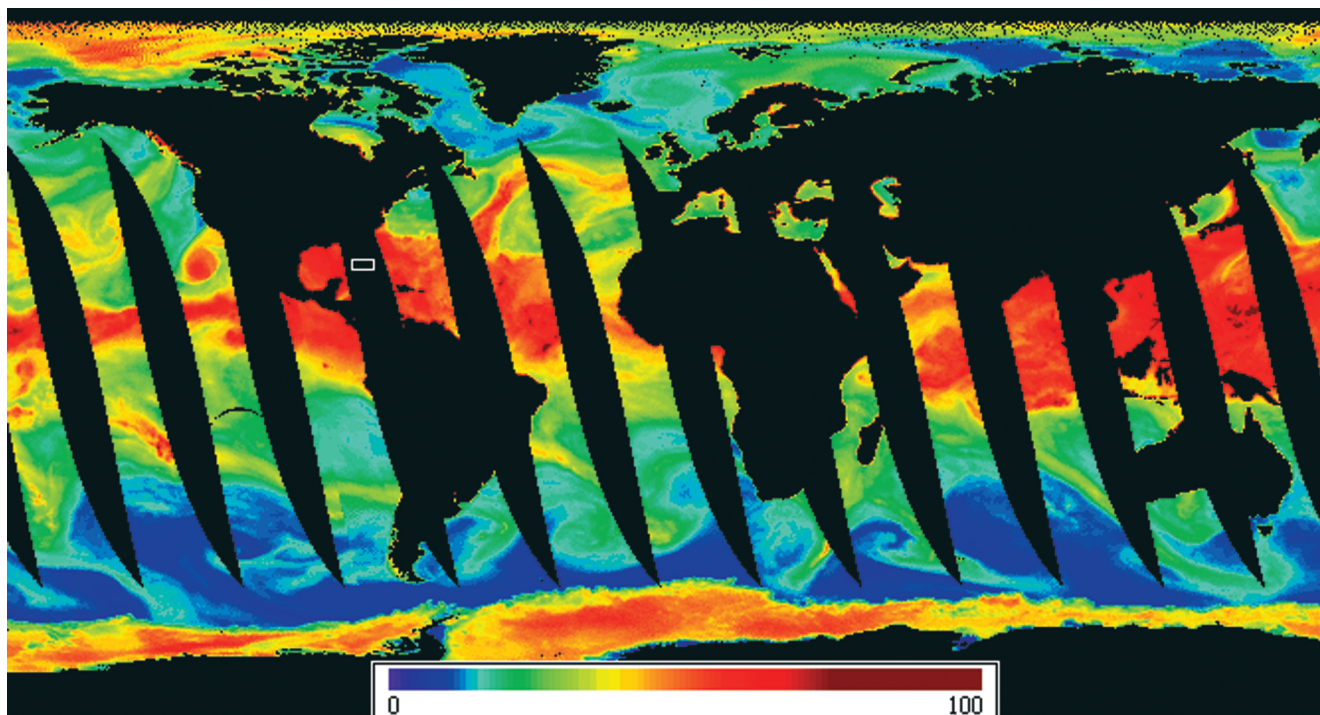


Рис. 1. Поле водяного пара на 26.08.2005, по данным измерений SSM/I на восходящих витках DMSP F13. Шкала в $\text{кг}/\text{м}^2$. Белый прямоугольник – область, пройденная ТЦ Katrina за суточный период 26.08.2005.

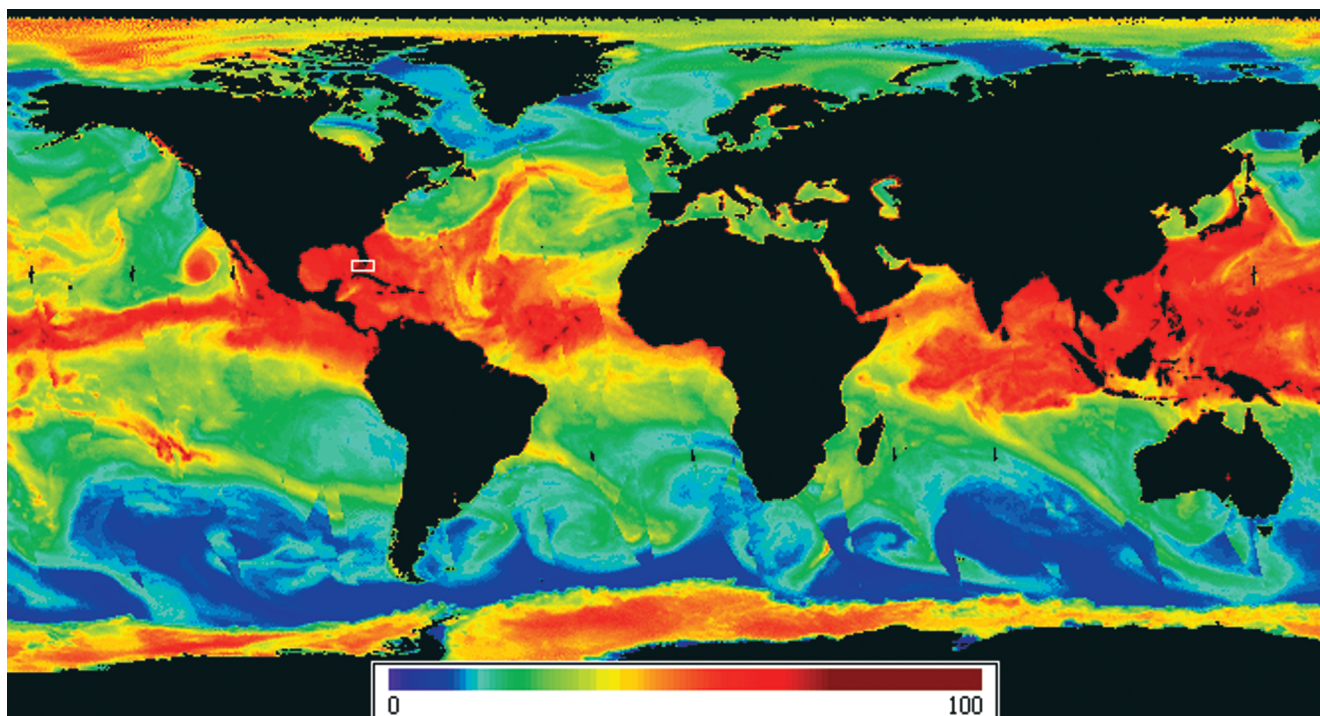


Рис. 2. Поле водяного пара на 26.08.2005, по данным измерений SSM/I со всех спутников DMSP. Шкала в $\text{кг}/\text{м}^2$. Белый прямоугольник – область, пройденная ТЦ Katrina за 26.08.2005.



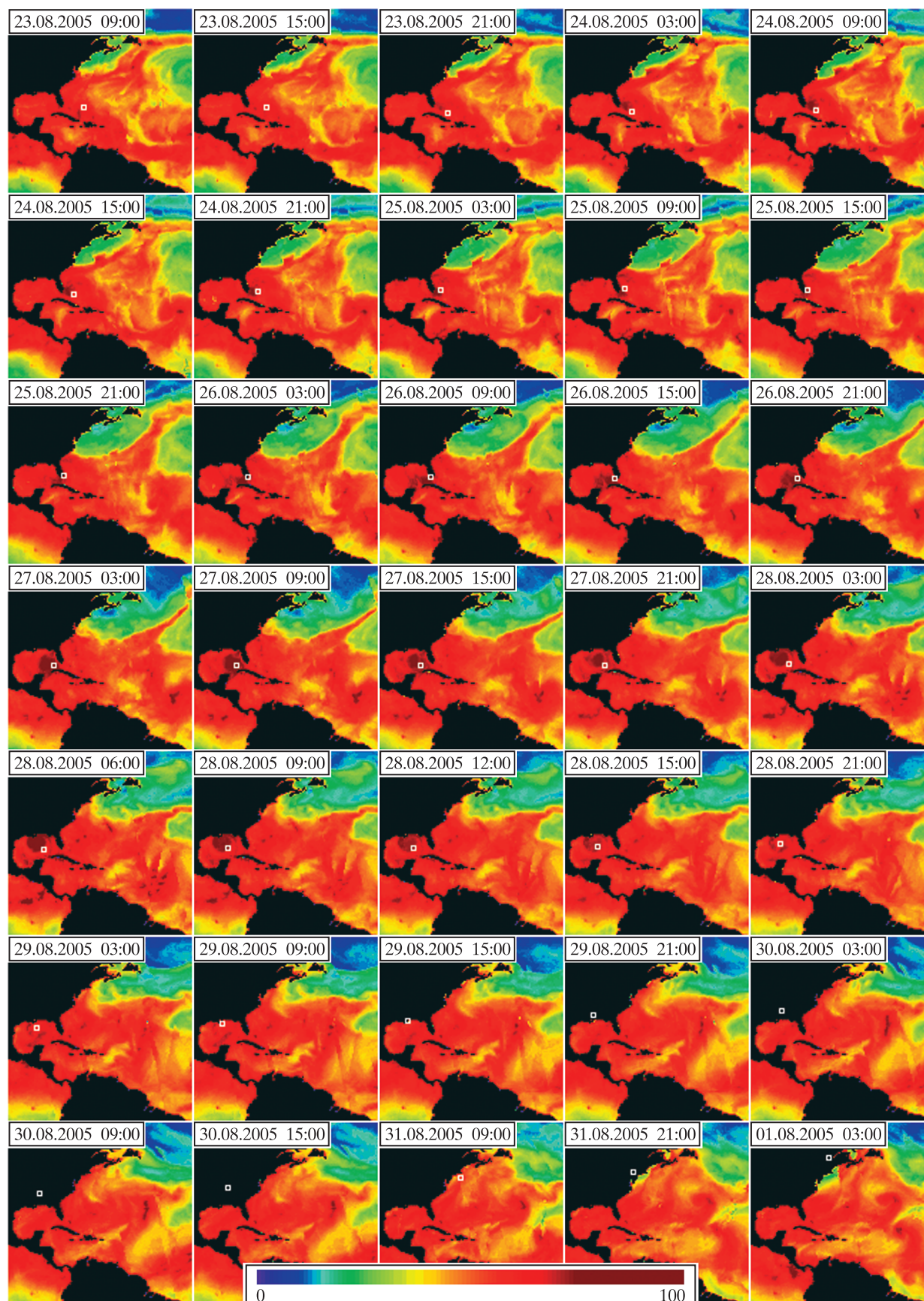


Рис. 3. Пример временной интерполяции поля водяного пара (район северо-западной Атлантики) за 23.08.2005–01.09.2005. Время отмечено по Гринвичу (GMT). Шаг по времени – 3 ч. Белый квадрат – положение ТЦ Katrina, по базе данных GLOBAL-TC (Покровская, Шарков, 2006).

