

## Проблемы построения радиотепловых полей достаточной однородности при высоком пространственном разрешении по спутниковым измерениям

Д.М. Ермаков<sup>1,2</sup>, М.Д. Раев<sup>2</sup>, А.П. Чернушич<sup>1</sup>, Е.А. Шарков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт радиотехники и электроники РАН, Фрязинский филиал, Фрязино, Россия  
E-mail: dima@ire.rssi.ru

<sup>2</sup> Институт космических исследований РАН, Москва, Россия  
E-mail: e.sharkov@mail.ru

Предложена методика построения детальных полей интегрального паросодержания атмосферы (разрешение  $0,2^\circ$ ) по данным спутниковых микроволновых сканеров. Применение этой методики к данным измерений SSM/I за период 28.07–26.08 2000 г. в комплексе с ранее предложенной авторами методикой пространственно-временной интерполяции спутниковых карт позволило построить анимированную карту интегрального паросодержания атмосферы глобального покрытия с дискретизацией  $0,2^\circ$  и шагом по времени 1,5 часа. Достигнутые параметры анимационного продукта соответствуют наилучшим, заявленным в мировой литературе, и критически важны для анализа быстрых энергоемких процессов в атмосфере Земли. Отличием авторской методики является замкнутость вычислений относительно интерполируемой спутниковой информации и минимум модельных предположений (общая кинематическая модель оценки и компенсации движения).

**Ключевые слова:** SSM/I, интегральное паросодержание, пространственно-временная интерполяция.

### Введение

В настоящее время при исследовании быстро развивающихся процессов в атмосфере все большее значение приобретает «анимационный» подход: применение различных методик временной интерполяции для построения по спутниковым данным карт восстанавливаемых атмосферных параметров высокой дискретизации по пространству и времени (Wimmers and Velden, 2007, 2011). В указанных работах поля интегрального паросодержания атмосферы (далее – поля  $W$ ) восстанавливались на регулярной градусной сетке  $0,25^\circ$  с шагом 1 час. С этой целью помимо радиотепловых данных к расчетам привлекалась информация о полях ветра в нижней тропосфере (на основании моделирования, прогноза и/или из оперативной спутниковой информации). Связь между полями ветра на разных горизонтах и кинематикой поля  $W$ , очевидная на качественном уровне, носит непростой характер, ее параметры в (Wimmers and Velden, 2011) были частично подобраны эмпирически методом проб и ошибок.

Авторами настоящей работы была ранее предложена методика оценки кинематики поля  $W$  и расчета его промежуточных состояний, не использующая дополнительной информации о полях скорости ветра (Ермаков и др., 2011). Методика была успешно опробована на данных SSM/I, интерполированных на сетку с шагом  $0,5^\circ$  (формат Grid). При этом было отмечено, что повышение пространственного разрешения «опорных» ежесуточных карт позволит проводить анализ эволюции полей  $W$  на качественно более высоком уровне. Основной сложностью при построении детальных карт  $W$  является невозможность накопления данных на длительных интервалах времени, так как для оценки кинематики атмосферных

процессов необходимы не усредненные, а «мгновенные» поля  $W$ . В настоящей работе описана созданная авторами методика, позволяющая строить карты «мгновенных» полей  $W$  дважды в сутки с разрешением  $0.2^\circ$  при полном покрытии поверхности Земли с использованием исключительно данных SSM/I нескольких спутников серии DMSP. Методика продемонстрирована на примере обработки интервала измерений SSM/I за 28.07 – 26.08 2000 г., позволившей, с дальнейшим применением временной интерполяции, создать анимированную карту  $W$  глобального покрытия с дискретизацией  $0.2^\circ$  и шагом по времени 1,5 часа в указанном интервале.

## **Методика построения детальных однородных изображений**

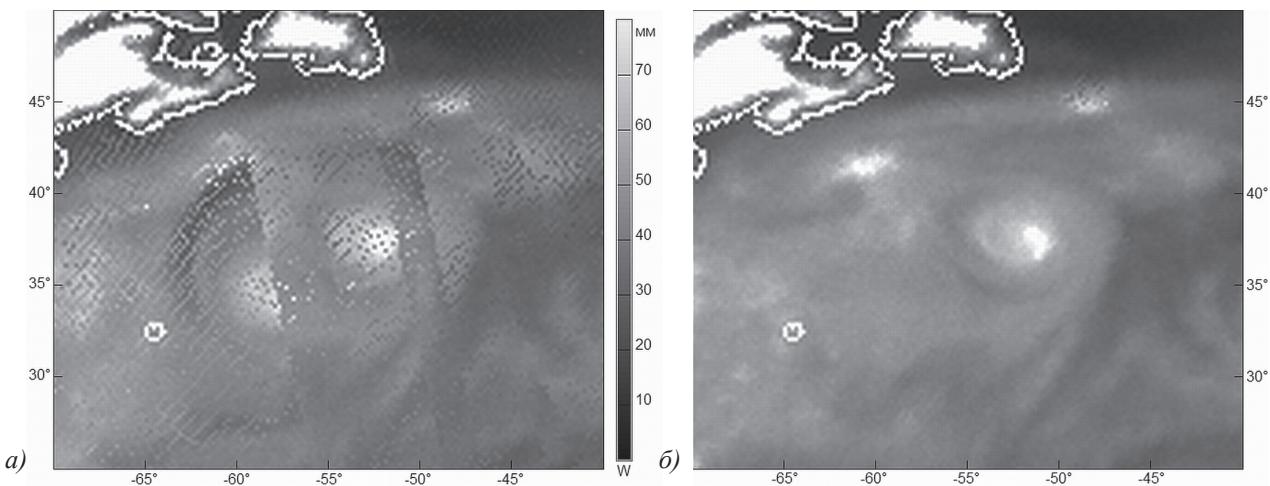
### *1. Предел повышения детализации спутниковых карт по данным SSM/I*

Продукты первичной обработки данных SSM/I, включая географически привязанные радиояркостные температуры, поставляются на сетках двух типов: сетке исходных измерений (Swath) и регулярной градусной сетке в проекции Меркатора (Grid). Регулярная сетка типа Grid удобна при обработке данных стандартными алгоритмами, однако при разрешении в  $0.5^\circ$  в ряде случаев не способна обеспечить необходимой для анализа детальности получаемых карт (Ермаков и др., 2011), где была обсуждена возможность перехода к обработке данных, поставляемых на сетке Swath. Параметры сканирования SSM/I таковы, что на одну ячейку (узел) сетки Grid вблизи экватора приходится в среднем по четыре измерения как на восходящих, так и на нисходящих витках. При объединении всех суточных данных трех одновременно работающих спутников (например, F13, F14, F15 серии DMSP) в одной ячейке Grid можно получить около 24 независимых измерений SSM/I, которые, при равномерном распределении, определят значения почти во всех узлах регулярной сетки с шагом  $0.1^\circ$ . В отношении спутниковых карт по данным SSM/I последнюю величину следует по двум причинам признать разумным пределом повышения пространственного разрешения (детальности): из-за отсутствия большего (чем 3) В скобках числа одновременно работающих приборов и из-за размеров пятна разрешения (диаметр более  $0.1^\circ$ ).

### *2. Проблема асинхронности спутниковых измерений*

Указанный выше предел детализации спутниковых карт по данным SSM/I в  $0.1^\circ$  достижим, если задача позволяет накопление данных на длительных интервалах времени. Однако при наблюдении быстро протекающих процессов в атмосфере такое накопление приводит к существенным искажениям информации, основные типы которых иллюстрирует *рис. 1-а*. На нем приведен фрагмент карты распределения интегрального паросодержания атмосферы (далее – карта паросодержания) для района Северной Атлантики, построенной по измерениям SSM/I на восходящих витках спутников F13, F14 и F15 за 12.08.2000 г. Можно видеть фантомное удвоение объекта (тела циклона), вызванное тем, что за время между пролетами спутников циклон быстро перемещался в атмосфере и наблюдался в разных

положениях, сдвиговые искажения в виде полос с резкими границами, а также «сетку» отдельных контрастных точек на более однородном фоне вследствие эволюции поля водяного пара и асинхронности спутниковых измерений над этим районом, достигавшей трех часов. Наши исследования показали, что для выбранного интервала времени (июль/август 2000 г.) наилучшую согласованность по времени обеспечивает комплексирование измерений со спутников F14 и F15 (*рис. 1-б*), отдельно на восходящих и нисходящих витках, с редкими включениями измерений со спутника F13. В связи с этим ограничением на объем используемой входной информации, детальность генерируемых карт ухудшили (по сравнению с предельной) до  $0,2^\circ$ , что, однако, немного превосходит детальность карт в (Wimmers and Velden, 2011),  $0,25^\circ$ , и гораздо лучше детальности данных формата Grid,  $0,5^\circ$ , и позволяет выполнить их анализ на качественно новом уровне.



*Рис. 1. Фрагменты карт интегрального паросодержания  $W$  (мм) между  $25^\circ$  и  $50^\circ$  с. ш. и  $40^\circ$  и  $70^\circ$  з. д. по данным SSM/I за 12 августа 2000 г.:*  
а) со спутников F13, F14, F15; б) со спутников F14, F15  
(см. пояснения в тексте)

### 3. Переход от сетки измерений к регулярной градусной сетке

С учетом малого шага регулярной сетки ( $0,2^\circ$ ), сопоставимого на экваторе с диаметром пятна разрешения низкочастотных каналов SSM/I, а также гладкости поля интегрального паросодержания на таких пространственных масштабах была принята простая методика интерполяции исходных данных на регулярную сетку. Для этого сначала рассчитывали величину  $W$  интегрального паросодержания по методике (Ruprecht, 1996) на исходной сетке Swath в соответствии с формулой:

$$W = 131,95 - 39,50 \cdot \ln(280 - T^{22V}) + 12,49 \cdot \ln(280 - T^{37V}),$$

где  $T^{22V}$  и  $T^{37V}$  – радиояркостные температуры, измеренные на вертикальной поляризации в каналах 22 ГГц и 37 ГГц соответственно. Следует отметить, что с точки зрения излагаемой методики способ расчета  $W$  не принципиален, так как входными данными для нее являются уже восстановленные (тем или иным способом) значения  $W$  на сетке измерений.

Значения  $W$  в каждом из узлов сетки Swath смещали в ближайший к нему узел (далее – «заполненный» узел) регулярной сетки. Затем оставшиеся незаполненными узлы регулярной сетки, имевшие как минимум два заполненных соседних узла (к югу, северу, западу и/или востоку), заполняли методом линейной интерполяции по ближайшим соседям. В результате при удачном взаимном расположении скановых полос разных спутников, формировалась суточная карта  $W$  с полным покрытием поверхности Земли за исключением узкой области около границы смены суток.

#### 4. Расхождение орбит спутников, образование лакун; алгоритм «сшивки»

Небольшие различия в параметрах орбит спутников приводят к тому, что скановые полосы SSM/I на спутниках F14 и F15 смещаются друг относительно друга и, как правило, не обеспечивают полного покрытия Земли за одни сутки. В результате на суточных картах паросодержания образуются области, не охваченные измерениями вследствие расхождения скановых полос («лакуны»). Их относительная площадь на карте может составлять 1% и меньше, но их присутствие существенно затрудняет применение алгоритма пространственно-временной интерполяции (Ермаков и др., 2011) для исследования динамики атмосферного паросодержания: при включении их в анализ, как элементов изображения, они вносят значительные возмущения в восстанавливаемое поле адвективных смещений; при исключении их из анализа становятся существенными краевые эффекты на границах лакун. В настоящей работе была развита методика доопределения поля  $W$  в области лакун, названная «сшивкой». Смысл методики состоит не в том, чтобы восстановить значения  $W$  с некоторой заранее известной точностью, а в том, чтобы «замаскировать» лакуны от алгоритма пространственно-временной интерполяции, т.е. чтобы расчетные поля адвективных смещений испытывали минимальные возмущения на границах лакун. Этот подход обеспечивает полное использование всей доступной спутниковой информации, не внося искажений в данные реальных измерений и лишь дополняя их «гладким образом» в области лакун (рис. 2).

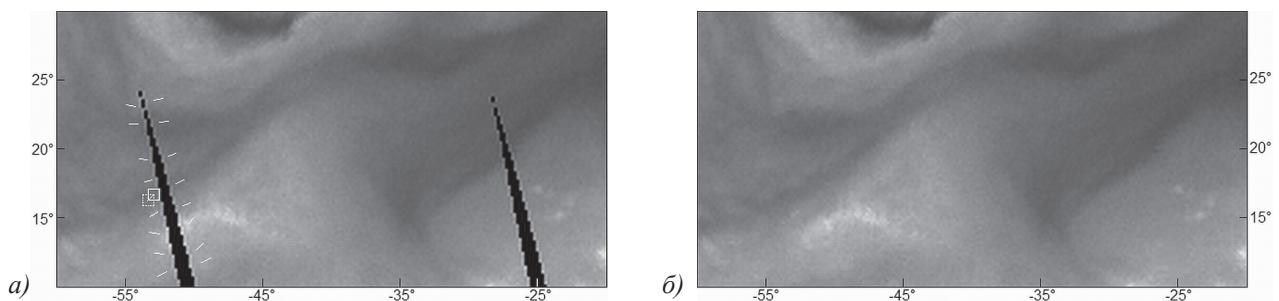


Рис. 2. Фрагмент карты интегрального паросодержания  $W$  (см. шкалу на рис. 1) между  $10^{\circ}$  и  $30^{\circ}$  с. ш. и  $20^{\circ}$  и  $60^{\circ}$  з. д. по данным SSM/I за 16 августа 2000 г.:  
а) до сшивки лакун; б) после сшивки лакун  
(см. пояснения в тексте)

Ограниченнный объем публикации позволяет привести здесь лишь качественное описание методики «сшивки» лакун. Идеологически она близка к известной методике оценки и компенсации движения (Richardson, 2003), использованной авторами в алгоритме пространственно-временной интерполяции, но применяется не к паре изображений, а к одному изображению в окрестности лакун. Внешний цикл алгоритма «сшивки» состоит в построчном сканировании карты  $W$  с запада на восток до обнаружения западной границы лакуны – очередного заполненного узла регулярной сетки, восточный сосед которого не заполнен. Алгоритм запоминает положение  $(x_r, y)$  граничного узла и продолжает сканирование до пересечения с восточной границей лакуны (определенной как первый заполненный узел после очередного незаполненного) в точке  $(x_s, y)$ . Ширина лакуны оценивается как  $l = x_r - x_s$  (принято, что  $x$  растет в направлении с запада на восток,  $y$  – с юга на север).

Далее управление передается во внутренний цикл алгоритма. Во внутреннем цикле на первом шаге строится квадратное окно (далее – базовое окно, см. *рис. 2-а*, белый квадрат) со стороной  $w$  и положением северо-западного угла в точке  $(x_s - w, y + w/2)$ . Ширина окна  $w$  задается равной  $l + w_{min}$ , где  $l$  – ширина лакуны,  $w_{min} = 1^\circ$  (или 5 узлов сетки), однако, если  $l + w_{min} > w_{max}$ , где  $w_{max} = 3.8^\circ$  (или 19 узлов сетки), то принимается  $w = w_{max}$ . Значения  $w_{min}$  и  $w_{max}$  выбраны из общих соображений относительно крупномасштабной структуры поля  $W$  и из опыта обработки большого массива данных SSM/I.

На втором шаге внутренний цикл ищет квадратный фрагмент поля  $W$  к западу от базового окна, минимально отличающийся по критерию SAD (Richardson, 2003) от поля  $W$  внутри базового окна. Для этого сравниваются фрагмент поля  $W$  в базовом окне с фрагментами поля в скользящем окне шириной  $w$  и координатой северо-западного угла  $(x_s - w/2, y_s)$ , где  $y_s$  пробегает диапазон значений от  $y - w$  до  $y + w$ . Алгоритм запоминает положение  $(x_s^*, y_s^*)$  северо-западного угла скользящего окна, в котором фрагмент поля  $W$  имеет минимальные отличия от фрагмента в базовом окне (см. *рис. 2-а*, пунктирный белый квадрат), и вычисляет вектор смещения  $s = (x_s - x_s^*, y - y_s^*)$ . Затем управление возвращается во внешний цикл алгоритма.

В результате работы описанных циклов алгоритма для каждого узла сетки, принадлежащего границе лакуны, строится свой вектор смещения  $s$  (на восточной границе лакуны внутренний цикл алгоритма работает аналогично, с точностью до зеркального отражения). Полученные векторы имеют смысл направлений наименьших градиентов поля  $W$  на характерных масштабах  $w$ . Их можно интерпретировать как генеральные направления основных адvectionных потоков в атмосфере, проявляющихся в поле интегрального паросодержания  $W$  (см. *рис. 2-а*, белые прямолинейные отрезки).

Окончательная «сшивка» лакун осуществляется экстраполяцией выделенных потоков на область лакуны, реализуемой по методике компенсации движения, составной части методики, более подробно описанной в работе (Ермаков и др., 2011) и цитированной в ней литературе. Результат сшивки для фрагмента на *рис. 2-а*, приведен на *рис. 2-б*.

## *5. Суточный переход. Выведение временного разрыва из области интереса*

Как правило, самая широкая лакуна на суточных картах SSM/I образуется на линии «суточного перехода» – между самой ранней и самой поздней скановыми полосами выбранного суточного интервала. Применение сшивки лакун к этой области некорректно, так как выполненные по разные стороны от нее измерения разделяют примерно 24 часа. Решением проблемы суточного разрыва стало его «смещение» в область, не представляющую интереса в контексте задачи исследования. В настоящей работе все суточные лакуны были смешены в область над Африкой. С этой целью начала суточных интервалов для формирования суточных карт выбирались так, чтобы первая скановая полоса проходила по западному побережью Африки или чуть восточнее вглубь континента. Соответственно, последняя скановая полоса выбранного суточного интервала приходилась на восточную часть Африки. К построенным таким образом суточным картам применялась описанная выше процедура сшивки лакун. Поскольку формально рассчитанные над континентами значения поля  $W$  не имели физического смысла и исключались из дальнейшего анализа, сшивка лакуны суточного перехода над Африкой не влияла на качество получаемых карт и осуществлялась одновременно со сшивкой других лакун из соображений алгоритмической простоты.

## *6. Сбои и паузы в работе прибора. Привлечение дополнительных данных*

В ряде случаев из-за сбоев, технических пауз в работе приборов и т.п. на суточных картах  $W$  образуются области «разрывов» скановых полос, не заполненные данными измерений (*рис. 3-а*). На основе описанных выше методик можно предложить два подхода к восполнению данных в этих областях: сшивка лакун и/или привлечение дополнительной спутниковой информации. Каждый из этих подходов имеет известные недостатки для рассматриваемого случая. Поскольку ширина незаполненной области, как правило, равна ширине скановой полосы и значительно превышает среднюю ширину лакуны, то при сшивке могут образовываться характерные для методик экстраполяции артефакты: резкие «стыки», сдвиговые искажения, накопление ошибок и т.д. С другой стороны, при привлечении данных дополнительных спутниковых измерений возникает указанная выше проблема асинхронности. В настоящей работе по ряду причин (в том числе из-за сравнительно малого числа подобных случаев) не был выработан универсальный подход к решению проблемы «разрыва» скановой полосы. Каждый случай был проанализирован индивидуально, и оптимальное решение выбиралось методом проб и ошибок. В примере на *рис. 3-а* было установлено, что для заданных дня и области пространства измерения со спутника F13 имеют приемлемую синхронизацию с измерениями с F14 и F15. Конфигурации скановых полос спутников приведены на *рис. 3-б*. Таким образом, данные со спутника F13 были использованы для восстановления информации в большей части незаполненной области. К оставшейся части незаполненной области применили процедуру сшивки лакун. Полученная в результате карта содержит заметные артефакты обработки (*рис. 3-в*), однако в отличие от исходной вполне пригодна для использования в алгоритме пространственно-временной интерполяции.

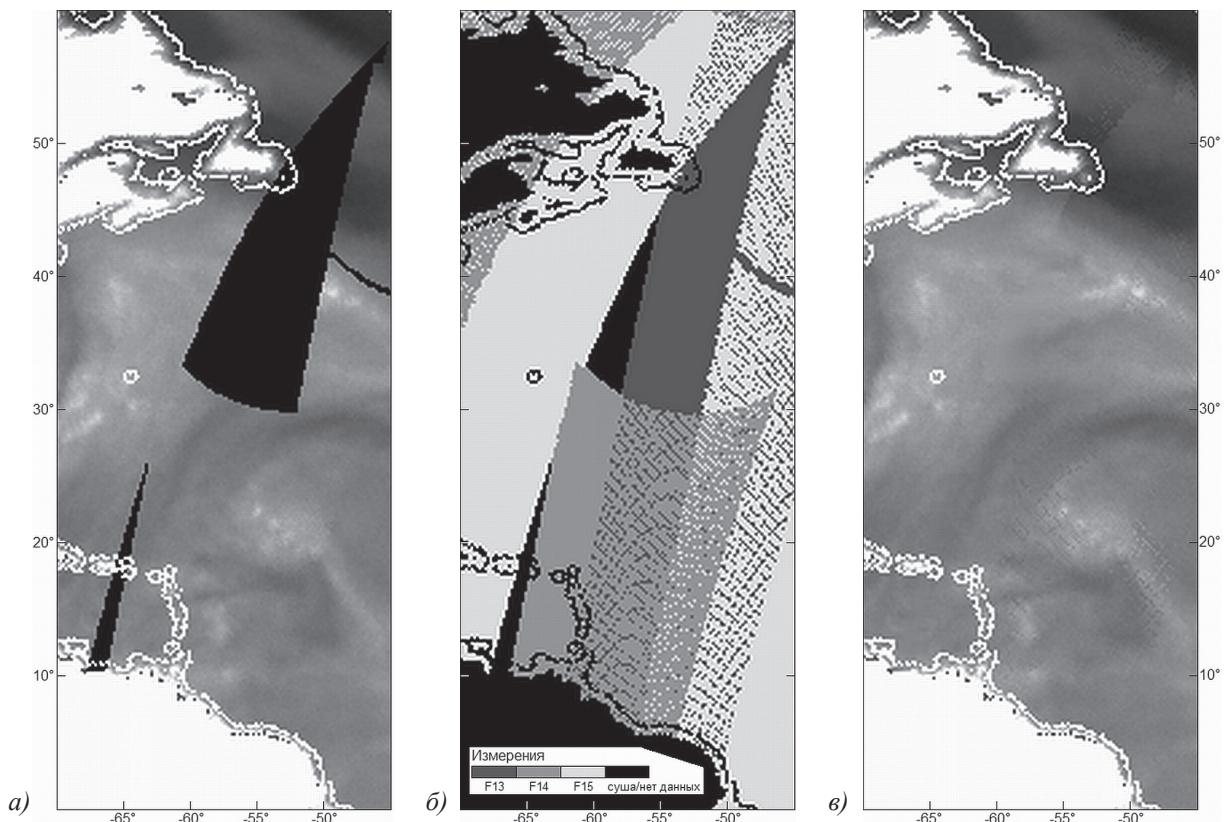
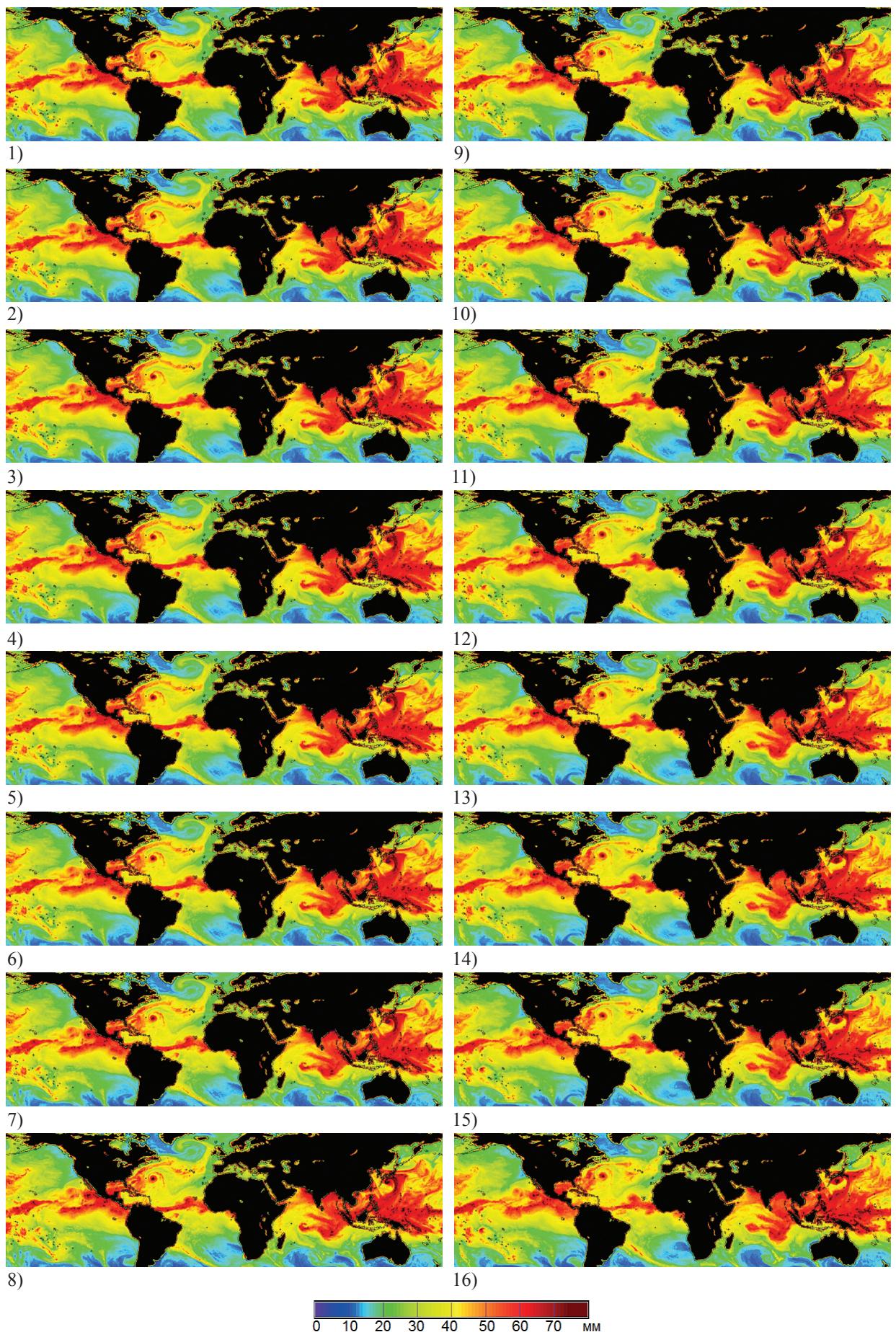


Рис. 3. Измерения SSM/I за 14.08.2000 между  $0^{\circ}$  и  $60^{\circ}$  с. ш. и  $45^{\circ}$  и  $70^{\circ}$  з. д.:  
а) карта  $W$  по данным спутников F14 и F15; б) скановые полосы F13, F14, F15;  
в) карта  $W$  по данным спутников F13, F14, F15 (см. пояснения в тексте)

### Обсуждение результатов

Описанный набор предложенных и программно реализованных алгоритмов позволил строить спутниковые карты интегрального паросодержания  $W$  высокой детальности (пространственное разрешение  $0,2^{\circ}$ ) дважды в сутки (отдельно на восходящих и нисходящих витках) при полном покрытии поверхности Земли. Построенные таким образом карты в интервале времени 28.07.2000 – 26.08.2000 были использованы в качестве опорных для алгоритма пространственно-временной интерполяции (Ермаков и др., 2011) и обеспечили генерацию карт промежуточных состояний поля  $W$  с шагом по времени 1,5 часа. В результате был построен анимационный продукт, отражающий эволюцию поля интегрального паросодержания во всем выбранном интервале наблюдений (июль/август 2000 г.) с указанной детализацией по пространству и времени. Примеры кадров анимационного продукта приведены на рис. 4. Достигнутые параметры пространственно-временного разрешения ( $0,2^{\circ}$  и 1,5 часа) сопоставимы с параметрами аналогичных активно развивающихся продуктов (Wimmers and Velden, 2011), которые находят все более широкое применение, в частности, при анализе циклонической активности экваториальной области Мирового океана и при мониторинге и прогнозировании развития и перемещения отдельных тропических циклонов. При этом следует отметить две отличительные особенности предлагаемого авторами настоящей работы подхода. Во-первых, развивающаяся



*Рис. 4. Кадры (1–16) анимированного поля  $W$  за 11 августа 2000 г.  
(фрагменты в широтном поясе от  $70^{\circ}$  с. ш. до  $40^{\circ}$  ю. ш.). Шаг по времени 1,5 часа.  
Цветовая шкала значений  $W$  в мм приведена внизу рисунка*

методика замкнута относительно обрабатываемых спутниковых данных. В частности, она не требует привлечения дополнительной оперативной и/или прогностической информации о глобальных полях ветра высокого пространственно-временного разрешения. Во-вторых, методика не имеет изначально заложенных в нее модельных предположений, жестко связывающих наблюдаемую эволюцию поля интегрального паросодержания с полем скорости ветра на определенных горизонтах нижней тропосфера. Вместо этого она основывается на более общем, «кинематическом» подходе, реализованном в стандартном алгоритме оценки и компенсации движения.

## Заключение

В результате последовательного развития алгоритмов генерации анимационных продуктов по данным спутниковых измерений достигнута возможность построения анимированных спутниковых карт интегрального паросодержания высокой детальности (пространственное разрешение  $0,2^\circ$ ) с шагом по времени 1,5 часа при полном охвате поверхности Земли. Анимационные продукты подобного уровня находят все более широкое применение при анализе быстрых, энергоемких атмосферных процессов (образование и эволюция тропических циклонов), а достигнутые авторами параметры соответствуют наилучшим, заявленным в мировой литературе (Wimmers and Velden, 2011). Отличительными особенностями предложенного подхода являются замкнутость вычислительной схемы относительно интерполируемой спутниковой информации и минимум модельных предположений, сведенных к общей кинематической модели оценки и компенсации движения (Richardson, 2003). Способ восстановления собственно значений  $W$  по измеренным радиояркостным температурам является, как и в аналогичных цитированных выше работах, внешним по отношению к методике интерполяции и может быть изменен в зависимости от предпочтений исследователя.

## Литература

1. 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.
2. Richardson I.E.G. H.264 and MPEG-4 video compression. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 SQ, England. 2003. 306 p.
3. Ruprecht E. Atmospheric water vapour and cloud water: an overview // Adv. Space Res. 1996. Vol. 18. No. 7. P. 5–16.
4. Wimmers A.J., Velden C.S. MIMIC: A new approach to visualizing satellite microwave imagery of tropical cyclones // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2007. Vol. 88. No. 8. P. 1187–1196.
5. Wimmers A.J., Velden C.S. Seamless advective blending of total precipitable water retrievals from polar-orbiting satellites // J. Appl. Meteor. Climatol. 2011. Vol. 50. No. 5, P. 1024–1036.

# **Problems of construction of radiothermal fields of sufficient uniformity at high spatial resolution by satellite measurements**

**D.M. Ermakov<sup>1,2</sup>, M.D. Raev<sup>2</sup>, A.P. Chernushich<sup>1</sup>, E.A. Sharkov<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup> Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Fryazino department, Fryazino, Russia*

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

*<sup>2</sup> Space Research Institute of RAS, Moscow, Russia*

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

A technique of construction of detailed atmospheric TPW fields (resolution of 0.2°) from satellite microwave scanners is proposed. Application of this technique to SSM/I measurements for the period of 07/28 – 08/26, year 2000 in conjunction with the previously proposed by the authors method of satellite maps space-time interpolation allowed to build animated TPW map of the global coverage with spatial sampling of 0.2° and time step of 1.5 hour. Achieved parameters correspond to the best animated products claimed in the world literature, and are critical to the analysis of fast energy-intensive processes in the Earth's atmosphere. An advantage of the authors' technique is the closed computational scheme in regards with the incoming satellite information, and minimum model assumptions (generic model of motion estimation/compensation).

**Keywords:** SSM/I, total precipitable water, spatiotemporal interpolation.