

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ  
КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ГЛОБАЛЬНЫХ РАДИОТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ  
СИСТЕМЫ ОКЕАН–АТМОСФЕРА ВЫСОКОЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-  
ВРЕМЕННОЙ ДИСКРЕТИЗАЦИИ ПО СПУТНИКОВЫМ  
МИКРОВОЛНОВЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ

© 2013 г. 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 Московской обл.

<sup>2</sup> Институт космических исследований РАН, Москва

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

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

Поступила в редакцию 30.12.2012 г.

В работе обсужден алгоритм построения глобальных радиотепловых полей системы океан–атмосфера высокой пространственно-временной детальности по спутниковым измерениям. Основное внимание уделено проблеме построения опорных ежесуточных изображений высокого пространственного разрешения. Построение таких опорных карт является важным подготовительным шагом для дальнейшего применения предложенной и реализованной авторами ранее методики пространственно-временной интерполяции. Разработанный программный комплекс, реализующий описанные алгоритмы, позволяет получить глобальные анимированные радиотепловые поля с временным шагом 1.5 ч и пространственным разрешением 0.2°. Достигнутые параметры принципиально важны для анализа сложных, быстро протекающих и энергоемких процессов в системе океан–атмосфера, связанных, в частности, с формированием и эволюцией тропических циклонов.

**Ключевые слова:** спутниковое микроволновое зондирование, интегральное паросодержание атмосферы, пространственно-временная интерполяция

DOI: 10.7868/S0205961413040027

ВВЕДЕНИЕ

Задачи исследования быстрых энергоемких процессов в системе атмосфера–океан, такие как прогнозирование возникновения первичных форм тропического возмущения, детальное изучение его структурных, динамических и термодинамических особенностей и характеристик окружающей среды в момент резкой интенсификации возмущения и перехода в развитую форму тропического циклона (ТЦ), занимают важное место в программах дистанционного мониторинга атмосферных катастроф (Шарков, 2010; Sharkov, 1998, 2012). В виду недостаточного пространственно-временного разрешения спутниковой информации в микроволновом диапазоне подобные исследования проводятся путем накопления данных на значительных временных интервалах и/или по большим площадям. В результате выявленные связи и построенные критерии эволюции ТЦ, (Ростовцева, Гончаренко, 2010) носят статистический смысл, характеризуя вероятность интенсификации ТЦ в пространственно-временном сегменте, определяемом масштабами осреднения. Поиск детерминированного критерия индивиду-

ального циклогенеза по микроволновым данным требует принципиально иного подхода.

В работе (Ермаков и др., 2011) авторами предложена методика построения анимированных карт поля интегрального паросодержания атмосферы (далее поля *W*). Развитие этой методики лежит в русле принятого авторами анимационного подхода (Ермаков и др., 2007) к анализу спутниковых дистанционных данных. Подобный анимационный подход находит все более широкое применение при исследовании быстро развивающихся процессов в атмосфере (Wimmers, Velden, 2007; 2011). Суть его заключается в применении различных интерполяционных моделей для построения по спутниковым данным карт восстанавливаемых атмосферных параметров высокой дискретизации по пространству и времени. Принципиальным отличием предложенной авторами методики от известных, цитированных выше, аналогов является замкнутость алгоритма относительно входных данных спутниковых измерений. Так, в (Wimmers, Velden, 2011) помимо радиотепловых данных к расчетам привлекались данные о полях ветра, полученные из независи-

мых оценок по циркуляционным моделям и/или по оперативным спутниковым измерениям. При этом параметры связи между полями ветра на разных горизонтах и кинематикой поля  $W$  в указанной работе были частично подобраны эмпирически методом проб и ошибок.

В предложенной авторами методике для расчета эволюции поля  $W$  на коротких интервалах времени (порядка 1.5–3 ч) применена известная модель оценки и компенсации движения (Richardson, 2003), позволяющая избежать привлечения дополнительных спутниковых данных и модельных расчетов. Методика была успешно опробована на практике при анализе данных SSM/I формата GRID (данные на регулярной градусной сетке с шагом  $0.5^\circ$ ), полученных за период наблюдений 23 августа–03 сентября 2005 г. (ТЦ Katrina) со спутников F13, F14, F15 серии DMSP (NASA). На основе разработанного программно-алгоритмического подхода решена важная задача о нахождении “мгновенного” источника скрытой энергии при интенсификации ТЦ Katrina по данным микроволнового спутникового зондирования комплекса SSM/I (Ермаков и др., 2012а, 2012б). Аналогичный эффект образования высокоэнергетического купола в поле водяного пара в момент интенсификации ТЦ был обнаружен ранее (Шарков и др., 2011) при анализе эволюции ТЦ Francisco (2001). Из анализа этой серии работ следует, что повышение пространственного разрешения опорных ежесуточных карт и уменьшение временной дискретизации при построении глобального поля водяного пара являются принципиальными моментами для выполнения комплексного анализа эволюции мигрирующих полей  $W$  и эволюции траекторий ТЦ на качественно более высоком уровне.

Одной из ключевых задач при использовании и дальнейшем развитии авторской методики является удовлетворение требования к качеству опорных (ежесуточных) карт  $W$ : при их построении необходимо минимизировать (в идеале – устранить) как области, не покрытые измерениями, так и артефакты, связанные с асинхронностью измерений приборами, размещенными на разных спутниках. В настоящей работе подробно описан разработанный авторами алгоритм, позволяющий строить по две опорные карты полей  $W$  на каждые сутки измерений с пространственным разрешением  $0.2^\circ$  при полном покрытии поверхности Земли, привлекая исключительно данные SSM/I нескольких спутников серии DMSP. Алгоритм отработан и проиллюстрирован на примере обработки периода измерений SSM/I за 28 июля–26 августа 2000 г. (ТЦ Alberto). Полученные опорные карты после дальнейшей временной интерполяции по авторской методике (Ермаков и др., 2011), позволили создать анимированную карту поля  $W$  глобального покрытия с дискретизацией  $0.2^\circ$  и шагом по времени 1.5 ч,

что сопоставимо с параметрами анимационных продуктов, развитых в алгоритмах локальной (Wimmers, Velden, 2007) и региональной (Wimmers, Velden, 2011) интерполяции.

Материал настоящей работы изложен следующим образом. В разделе 1 дана характеристика входной спутниковой информации, описаны наборы данных, используемые в алгоритме интерполяции, и базовые процедуры предварительной подготовки данных. В разделе 2 объяснена система принятых в работе обозначений, даны определения некоторых часто используемых вспомогательных величин и описан способ интерполяции измерений на регулярную градусную сетку с шагом  $0.2^\circ$ .

Раздел 3 посвящен важной проблеме сшивки лакун. Лакунами в работе названы области отсутствия спутниковых данных из-за расхождения скановых полос на низких и средних широтах. Лакуны вносят неустойчивость в результаты расчетов по модели оценки и компенсации движения вследствие краевых эффектов на границах. Процедура сшивки лакун направлена на минимизацию этих возмущений и максимально полное использование наличной спутниковой информации для анализа эволюции поля  $W$ .

Разделы 4 и 5 посвящены решению проблем суточного перехода и потери данных в результате сбоев (пауз) в работе приборов. Под суточным переходом понимается лакуна на суточной карте  $W$ , по две стороны которой располагаются данные, отстоящие друг от друга по времени измерений примерно на 24 ч. Применение процедуры сшивки лакун для суточного перехода некорректно, поэтому проблема решена переносом суточного перехода в область, не информативную в контексте решаемой задачи (в данном случае – в область над Африкой). Потери данных в результате сбоев одного из приборов могут быть компенсированы привлечением дополнительных спутниковых данных либо применением процедуры сшивки лакун. Обсуждены обе возможности, и приведен пример комплексного подхода, заключающегося в последовательном использовании каждой из них.

В разделе 6 представлены результаты обработки данных SSM/I по описанным выше методикам: детальные опорные карты поля  $W$  и полученная на их основе анимированная карта  $W$  с пространственным разрешением  $0.2^\circ$  и шагом по времени 1.5 ч. В заключении обсуждены итоги и перспективы работы в свете активно развивающегося и находящего все большее применение в мировой практике анимационного подхода.

## 1. ХАРАКТЕРИСТИКА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Данные спутниковых измерений SSM/I в формате SWATH поставляются в файлах двух типов:

собственно радиоярких температур в семи каналах SSM/I и сопутствующей информации (географической привязки, времени измерений, типа подстилающей поверхности, признаков качества данных и т.д.). В отличие от формата GRID (измерения, накопленные за сутки и приведенные к регулярной градусной сетке), в формате SWATH структурной единицей хранения данных является полоса — совокупность измерений, полученных на пролете спутником половины орбиты (на восходящем или нисходящем витке). Всего за сутки получается около 29 таких витков и соответственно столько же наборов файлов радиоярких температур и сопутствующей информации. Внутреннее представление данных в файлах соответствует стандарту HDF. Поскольку стандарт поддержан набором полнофункциональных библиотек, для работы с файлами hdf можно использовать разнообразное программное обеспечение сторонних разработчиков, а также создавать собственные специализированные приложения (Ермаков и др., 2007). Кроме того, группа разработчиков HDFGroup ([www.hdfgroup.org](http://www.hdfgroup.org)), занимающаяся в настоящее время поддержкой и развитием стандарта HDF, предлагает собственные свободно распространяемые программные продукты. Так, в настоящей работе при организации потоковой обработки архивных данных SSM/I была использована консольная утилита hdp, которая позволяет избирательно экспортировать данные из файлов hdf в файлы других форматов.

Без потери общности можно считать, что после извлечения из файлов hdf использованные в работе данные представляют собой набор одномерных массивов, индексированных порядковым номером измерения  $i$  во всем рассматриваемом интервале наблюдений. В этот набор входят массивы радиоярких температур  $T_i^c$ , где верхний индекс  $c$  соответствует одному из семи измерительных каналов, а также массивы широт  $lat_i$  и долгот  $lon_i$  точек измерений и др. На начальном этапе обработки по радиоярким температурам в каналах  $T^{22V}$  (22 ГГц, вертикальная поляризация) и  $T^{37V}$  (37 ГГц, вертикальная поляризация) восстанавливались поля интегрального паросодержания атмосферы по формуле, предложенной в (Ruprecht, 1996)

$$W_i = 131.95 - 39.50 \ln(280 - T_i^{22V}) + 12.49 \ln(280 - T_i^{37V}). \quad (1)$$

Следует отметить, что расчет  $W$  по формуле (1) не является требованием описываемой далее методики. Вместо этого возможно использование других алгоритмов восстановления интегрального паросодержания (или других геофизических характеристик) по радиотепловым сигналам, а

также, в принципе, непосредственно полей радиоярких температур.

Необходимым условием является удовлетворение более общего предположения, а именно — справедливости применяемой известной модели оценки и компенсации движения (Richardson, 2003). В контексте решаемых задач физический смысл этого условия заключается в том, что изменения поля восстанавливаемой величины во времени объясняются в основном адвективными потоками в системе атмосфера—подстилающая поверхность, а все прочие процессы (конвективный перенос, фазовые переходы и т.д.) на большинстве масштабов вносят поправки следующего порядка малости. С учетом (1) далее в работе все методики интерполяции рассматриваются применительно к полю восстановленного по данным SSM/I интегрального паросодержания атмосферы (далее полю  $W$ ). Считается, что  $i$ -му измерению, выполненному над точкой с широтой  $lat_i$  и долготой  $lon_i$ , соответствует значение  $W_i$  (1). Кроме массивов указанных величин используется массив  $q_i$  признаков качества данных и типа подстилающей поверхности, которые наряду с географическими координатами извлекаются из архивных файлов сопутствующей информации.

Следует иметь в виду, что для заданного интервала наблюдений могут быть доступны данные измерений SSM/I с нескольких спутников серии DMSP. Чтобы различать массивы данных, относящихся к измерениям с разных спутников, а также данные, полученные на восходящих и нисходящих витках каждого спутника, будем использовать верхний индекс, например  $W_i^s$ , где  $s$  может принимать значения 13A (восходящие витки спутника F13), 13D (нисходящие витки F13), 14A и т.д.

## 2. ИНТЕРПОЛЯЦИЯ НА РЕГУЛЯРНУЮ СЕТКУ

Предложенная авторами методика построения анимированных карт интегрального паросодержания атмосферы, опирающаяся на известный алгоритм оценки и компенсации движения, предполагает вычисления на регулярной градусной сетке при необходимом условии отсутствия пропусков в данных (незаполненных узлов сетки). Ранее это условие удовлетворялось путем комплексирования данных SSM/I в формате GRID, полученных с нескольких спутников серии DMSP (Ермаков и др., 2011). При этом было отмечено, что данные формата GRID (пространственное разрешение  $0.5^\circ$ ) не способны обеспечить требуемую в ряде задач детальность карт поля  $W$ . Для повышения детальности было предложено перейти к обработке данных в формате SWATH, которые следует пред-

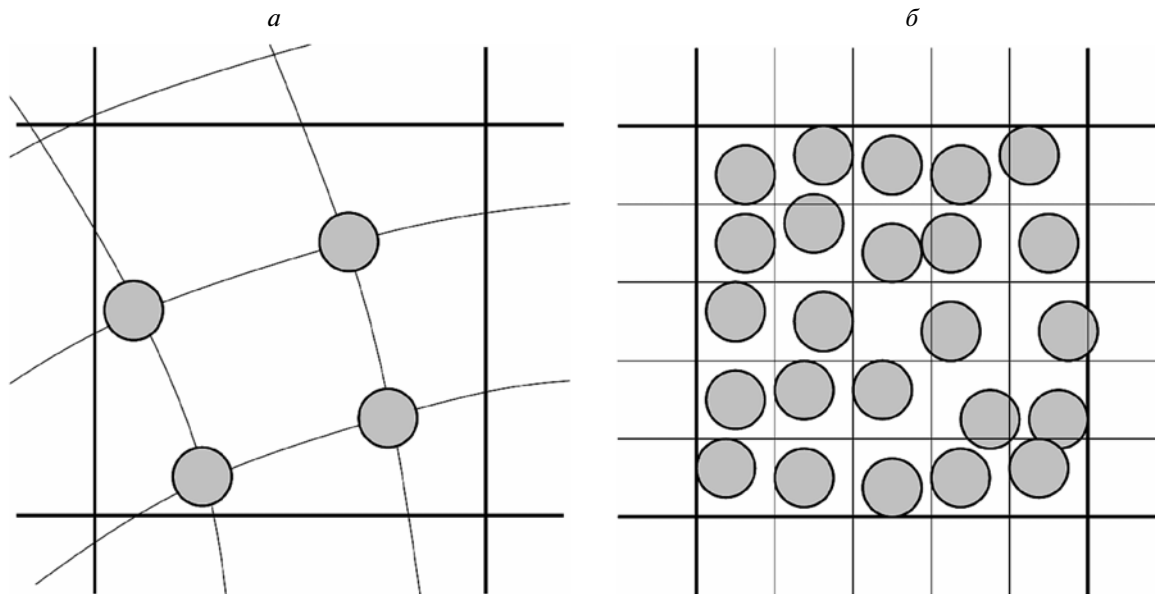


Рис. 1. Интерполяция данных SSM/I в формате SWATH на регулярную сетку. Тонкие линии на: *a* – линии сканирования SSM/I; *б* – ячейки сетки  $0.1^\circ$ . Толстые линии – ячейка сетки GRID ( $0.5^\circ$ ). Кружки – точки измерений SSM/I.

варительно интерполировать на регулярную сетку с меньшим шагом. При однократном пролете спутника над экваториальной областью в каждую ячейку сетки GRID попадает в среднем около четырех измерений прибора SSM/I (рис. 1а). Накопление в суточном интервале измерений с трех спутников на восходящих и нисходящих витках практически обеспечивает полное покрытие узлов регулярной сетки с шагом  $0.1^\circ$  (рис. 1б). При этом, однако, для ряда приложений становится критичной асинхронность накопленных измерений. В настоящей работе шаг сетки был выбран равным  $d = 0.2^\circ$ . Он близок к шагу измерений SSM/I и размеру пятна разрешения низкочастотных каналов на экваторе, а, с другой стороны, обеспечивает детальность карт поля  $W$ , сопоставимую с детальностью аналогичных анимационных продуктов, активно развивающихся и находящих применение в мировой практике (Wimmers, Velden, 2011).

Учитывая диапазон допустимых значений широт (от  $-90^\circ$  на юге до  $+90^\circ$  на севере) и долгот (от  $-180^\circ$  на западе до  $+180^\circ$  на востоке), а также заданный шаг в  $0.2^\circ$ , удобно выбрать размеры сетки, равные  $L = 360^\circ/0.2^\circ = 1800$  точек по ширине и  $H = 180^\circ/0.2^\circ = 900$  точек по высоте, а узлы сетки обозначать с помощью пары индексов:  $x = 1..L$  – порядкового номера узла в строке и  $y = 1..H$  – порядкового номера строки. При этом считается, что верхняя строка ( $y = 1$ ) соответствует  $+90^\circ$  широты (северный полюс), левый столбец ( $x = 1$ ) –  $180^\circ$  долготы. Для  $i$ -го наблюдения, выполненного над точкой с географическими координатами  $lat_i$  и

$lon_i$ , ближайший узел регулярной сетки ( $x_i, y_i$ ) находится по формуле

$$\begin{aligned} x_i &= [(lon_i + 180^\circ)/0.2^\circ + 0.5], \\ y_i &= [(-lat_i + 90^\circ)/0.2^\circ + 0.5], \end{aligned} \quad (2)$$

где квадратные скобки обозначают операцию округления до целого.

Величину  $W$ , интерполированную на регулярную сетку, будем отличать по наличию у нее двух нижних индексов  $W_{x,y}$ , соответствующих координатам узла сетки. Дополнительно введем вспомогательную величину  $n_{x,y}$ , характеризующую заполнение узлов сетки интерполируемыми значениями  $W$ .

Интерполяция проводится для данных, полученных на суточном интервале измерений. Данные, относящиеся к измерениям в разные сутки, интерполируются независимо. Для простоты рассмотрим один суточный интервал измерений. Фактически это означает, что пределы изменения нижнего индекса величины  $W_i^s$ ,  $i_{\min}^s \leq i \leq i_{\max}^s$  выбираются таким образом, чтобы времена измерений каждым из спутников попадали в один суточный интервал времени (верхний индекс  $s$  подчеркивает тот факт, что диапазоны порядковых номеров измерений для разных спутников могут различаться).

Интерполяция суточных данных осуществляется в два этапа. На первом этапе инициализируются значения  $n_{x,y}$ :  $n_{x,y} = 0$ ,  $x = 1..L$ ,  $y = 1..H$ . Затем значения  $W_i^s$  “смещаются” в ближайшие узлы



сетки, а значения  $n_{x,y}$  для этих узлов приравняются 1. С этой целью сначала выбирается набор массивов данных (т.е. последовательность индексов  $s$ , определяющих номера спутников и типы витков), которые будут интерполированы совместно. Затем для каждого индекса  $s$  из этой последовательности индекс  $i$  пробегает весь диапазон своих допустимых значений, при этом для каждого измерения  $W_i^s$  рассчитывается по (2) ближайший узел сетки  $(x, y)$  и происходит пересчет значений  $W_{x,y}$  и  $n_{x,y}$  по правилу

$$W_{x,y} := \begin{cases} W_i^s, & \text{при } n_{x,y} = 0, \\ W_{x,y}, & \text{при } n_{x,y} = 1. \end{cases} \quad (3)$$

$$n_{x,y} := 1,$$

$$i = i_{\min}^s \cdot i_{\max}^s.$$

Символ “:=” обозначает здесь и далее операцию присваивания переменной нового значения. Как видно из (3), изменение значения  $W_{x,y}$  происходит только в том случае, если соответствующий узел сетки не был ранее заполнен ( $n_{x,y} = 0$ ). После заполнения узла значение  $n_{x,y}$  устанавливается равным 1, что исключает повторный пересчет  $W_{x,y}$  в (3).

По завершении первого этапа интерполяции существенная доля узлов сетки остается незаполненной. Это происходит по одной из трех причин. Случаи, относящиеся к двум первым причинам, расхождению спутниковых витков вблизи экватора (см. раздел 3) и пропусков данных из-за отдельных сбоев в работе приборов (см. раздел 5), рассмотрены ниже. Третья причина состоит в том, что (3) не учитывает реальных размеров пятна разрешения прибора на поверхности и осуществляет интерполяцию простым “сдвигом” значений к ближайшим узлам сетки. При этом, как правило, возникает ситуация чередования заполненных и незаполненных узлов сетки в пределах полосы сканирования. Для заполнения таких пропущенных узлов (с учетом гладкости изменения поля  $W$  — на масштабах шага сетки  $d$ ) осуществляется второй этап интерполяции  $W$  по ближайшим соседям. При этом принимается правило, что интерполяция в заданном незаполненном узле осуществляется только в том случае, если хотя бы два его соседних узла заполнены — этому узлу присваивается значение, равное среднему арифметическому значению во всех заполненных соседних узлах. При поиске заполненных соседних узлов учитывается циклический переход меридиана  $180^\circ$ , т.е. крайний левый и крайний правый узлы каждой строки также считаются соседними.

Второй этап интерполяции выполняется однократно, заполненные на этом этапе узлы сетки не учитываются при заполнении оставшихся узлов.

Важным вопросом является выбор последовательности индексов  $s$ , используемых на этапе интерполяции по формуле (3). Привлечение данных большого числа спутников или объединение на одной сетке данных восходящих и нисходящих витков приводит к возникновению характерных артефактов, связанных с асинхронностью измерений: фантомное удвоение наблюдаемых объектов, возникновение резких границ и сдвиговых искажений, скачки значений восстанавливаемых параметров, связанные с суточным ходом радиоярких температур. Их проявления иллюстрирует пример на рис. 2а (см. на цветн. вклейке), на котором представлен интерполированный фрагмент карты  $W$ , полученный по измерениям на восходящих витках спутников F13, F14 и F15 серии DMSP за 12.08.2000 г. Видно “раздвоившееся” тело циклона, зарегистрированного с трехчасовой разницей сначала со спутника F13, а затем со спутников F14 и F15, а также границы, вызванные эволюцией поля  $W$  в этот интервал времени, и характерную “зашумленность” вследствие суточного хода температур. Исключение данных F13 практически полностью устраняют отмеченные артефакты (рис. 2б). Тщательный анализ результатов объединения информации с разных спутников для выбранного интервала времени (июль/август 2000 г.) показал, что наилучшую согласованность по времени обеспечивает комплексирование измерений со спутников F14 и F15 (рис. 2б), отдельно на восходящих и нисходящих витках, с эпизодическими включениями измерений со спутника F13 (см. раздел 5).

### 3. СШИВКА ЛАКУН

При использовании только данных спутников F14 и F15 на суточных картах  $W$  образуются лакуны — области, не охваченные измерениями вследствие расхождения скановых полос (рис. 3а на цветн. вклейке). Их относительная площадь может составлять менее 1%, но их присутствие существенно затрудняет применение алгоритма пространственно-временной интерполяции (Ермаков и др., 2011) для исследования динамики атмосферного паросодержания в связи с краевыми эффектами на границах лакун. Ниже описана предложенная авторами методика, названная “сшивкой лакун”. Ее смысл состоит в том, чтобы доопределить поле  $W$  в области лакун таким образом, чтобы замаскировать лакуны для более эффективной работы алгоритма пространственно-временной интерполяции, т.е. чтобы расчетные поля адвективных смещений испытывали минимальные возмущения на границах лакун. С этой целью в окрестности лакун производится расчет векторов направлений наименьших локальных изменений поля  $W$  по методике, аналогичной применяемой в алгоритме оценки движения (Richard-

son, 2003). Затем производится экстраполяция поля  $W$  в область лакун вдоль рассчитанных ранее векторов (по аналогии с алгоритмом компенсации движения). Эту процедуру можно интерпретировать как продолжение основных адвективных потоков, наблюдаемых в поле  $W$ , в область лакун. Такой прием не гарантирует восстановление значений  $W$  в лакунах с некоторой наперед заданной точностью, но направлен на минимизацию возмущений в решении, получаемом при дальнейшей пространственно-временной интерполяции, и дает возможность максимально использовать все имеющиеся спутниковые данные.

Далее рассмотрим более подробно два основных шага процедуры сшивки лакун: расчет векторов направления экстраполяции и собственно экстраполяции по заданному вектору. Введем массив весовых коэффициентов  $w_{x,y}$ , определенных на всей сетке. В области лакун весовые коэффициенты сначала имеют нулевое значение и могут увеличиваться на дробную величину в процессе сшивки. В областях, заполненных данными после процедуры интерполяции (см. раздел 2), положим  $w_{x,y} = -1$ .

Кроме того, сформулируем правило для вычисления узла  $(x^j, y^k)$ , удаленного от заданного узла  $(x, y)$  на  $j$  позиций по горизонтали ( $j < 0$  соответствует движению влево, на запад) и  $k$  позиций по вертикали ( $k < 0$  соответствует движению вверх, на север). При этом учтем циклический переход через меридиан  $180^\circ$  (возврат в крайнюю левую точку строки по достижении ее правого края при движении с запада на восток и наоборот)

$$x^j = (x + L + j - 1) \% L + 1, \quad y^k = y + k. \quad (4)$$

Символ  $\%$  обозначает операцию взятия остатка от целочисленного деления. Предполагается, что операция (4) никогда не выводит значение  $y^k$  за пределы допустимого диапазона  $1..H$ , так как окрестности полюсов не охвачены измерениями SSM/I и не участвуют в расчетах.

Опишем процедуру расчета вектора направления экстраполяции (рис. 3а), относящегося к заданному граничному узлу лакуны  $(x, y)$ . Пусть узел лежит на западной границе лакуны (серый кружок на рис. 3а)

$$w_{x,y} = -1, \quad w_{x^{+1},y} \geq 0, \quad (5)$$

где величина  $x^{+1}$  рассчитывается по правилу (4). Сначала необходимо вычислить ширину лакуны  $l$  на заданной широте в соответствии со следующим определением:

$$w_{x^j,y} = -1, \quad w_{x^j,y} \geq 0, \quad j = 1..l - 1. \quad (6)$$

Ширина лакуны  $l$  определяет характерный пространственный масштаб  $d$  для поиска вектора направления экстраполяции

$$d = [l/2 - 0.5] \times 2 + 5. \quad (7)$$

Как и ранее, квадратные скобки означают операцию округления до целого, которая применяется для того, чтобы величина  $d$ , выраженная в числе узлов сетки, всегда была нечетной. Таким образом, минимальное значение, принимаемое  $d$  равно  $d_{\min} = 5$  узлам сетки, что соответствует  $1^\circ$  долготы. Ограничение снизу необходимо для обеспечения минимальной статистики при поиске адвективных потоков в поле  $W$ . Замечено, однако, что при слишком больших значениях  $d$  на этапе экстраполяции происходит потеря особенностей малого масштаба, поэтому дополнительно вводится ограничение сверху

$$d := \begin{cases} d, & \text{при } d < d_{\max}, \\ d_{\max}, & \text{при } d \geq d_{\max}. \end{cases} \quad (8)$$

Значение  $d_{\max}$  выбрано равным 19, что соответствует  $3.8^\circ$  долготы. Если ширина лакуны превышает значение  $d_{\max}$ , процедуру сшивки можно повторять неоднократно, как это пояснено ниже. Граничные значения установлены из общих соображений относительно структуры поля  $W$  на масштабах наблюдений и из опыта обработки большого массива данных SSM/I. Нужно отметить, что выбор фиксированных граничных величин не является необходимым требованием представленной методики и может быть изменен оператором при обработке данных.

Определив характерный пространственный масштаб экстраполяции  $d$ , алгоритм расчета направления экстраполяции строит к западу от граничного узла  $(x, y)$ , см. (5), базовое квадратное окно (белый квадрат на рис. 3а) со стороной  $d$  и верхним левым узлом  $B = (x_B, y_B)$ , индексы которого определяются по правилу (4)

$$x_B = x^{-d}, \quad y_B = y^{-[d/2-0.5]}. \quad (9)$$

В алгоритме поиска направления экстраполяции используется базовая идея критерия SAD (Sum of Absolute Differences) – сумма абсолютных разностей (Richardson, 2003). SAD использует понятие суммы абсолютных разностей, которая для двух квадратных окон со сторонами  $d$  и левыми верхними углами  $B(x_B, y_B)$  и  $N(x_N, y_N)$  соответственно может быть вычислена следующим образом:

$$S(B, N) = \sum_{j=0}^{d-1} \sum_{i=0}^{d-1} |s_{i,j}|, \quad (10)$$

$$s_{i,j} = \begin{cases} W_{x_B^i, y_B^j} - W_{x_N^i, y_N^j}, & \text{при } w_{x_B^i, y_B^j} = -1, \quad w_{x_N^i, y_N^j} = -1, \\ 0, & \text{при } w_{x_B^i, y_B^j} \geq 0 \text{ или } w_{x_N^i, y_N^j} \geq 0. \end{cases}$$

Здесь прямые скобки означают вычисление модуля выражения. Величина  $s_{i,j}$  введена для того, чтобы критерий SAD учитывал только значения поля  $W$ , вычисленные до этапа сшивки лакун. В обозначении  $s_{i,j}$  указания на зависимость от выбора узлов  $B$  и  $N$  для компактности опущены.

Рассматриваются все фрагменты поля  $W$ , отстоящие от фрагмента  $W$  в базовом окне (рис. 3а) на  $d/2$  к западу и удаленные не более чем на  $d/2$  к югу и северу (расстояния измеряются по их верхним левым узлам  $N$  и  $B$  соответственно). Для каждого из возможных  $N$  вычисляется сумма  $S$  (10). Согласно оригинальному критерию SAD верхний левый узел  $N^*$  фрагмента поля  $W$ , наименее отличающегося от фрагмента  $W$  в базовом окне (серый квадрат на рис. 3а), следует искать по минимуму этой суммы.

Однако на величину  $S(B, N)$  оказывает влияние число  $c(B, N)$  включенных в расчет пар заполненных узлов сетки (10), которое в свою очередь может быть переменным, так как зависит от формы лакуны в окрестности базового окна и других факторов. С учетом этого в качестве  $N^*$  брали взвешенное положение всех верхних левых узлов  $N$ , с весами, зависящими от соответствующих значений  $S(B, N)$

$$\begin{aligned} N^* &= (x^{-[3d/2-0.5]}, y_S), \\ p_{B,N_j} &= \exp(-S(B, N_j) / (c(B, N_j) d^2)), \\ y_S &= \sum_{j=0}^{d-1} y^{-j} p_{B,N_j} / \sum_{j=0}^{d-1} p_{B,N_j}, \quad N_j = (x^{-[3d/2-0.5]}, y^{-j}). \end{aligned} \quad (11)$$

Здесь  $S(B, N_j)$  определено как в (10),  $c(B, N)$  – число включенных в расчет по (10) пар заполненных узлов сетки. Весовая функция  $p$  подобрана экспериментально таким образом, чтобы отдавать предпочтение фрагментам поля  $W$ , наименее отличающимся от фрагмента в базовом окне по критерию SAD с учетом числа узлов, участвовавших в вычислении критерия. Теперь вектор направления экстраполяции для данного узла  $(x, y)$  можно вычислить как вектор, соединяющий узел  $N^*$  с узлом  $B$ , или, разделив для удобства дальнейших вычислений на  $d/2$ , следующим образом:

$$\mathbf{v} = (v_x; v_y) = (1; 2(y_B - y_S)/d). \quad (12)$$

Полученный вектор (рис. 3а) задает направление экстраполяции поля  $W$  при заполнении лакуны слева (с запада). Для краткости здесь не будут приведены аналогичные формулы для вычисления направления экстраполяции справа (с востока). Их вывод осуществлялся на основе тех же рассуждений, а отличия от приведенных выше выражений (5)–(12) сводятся к зеркальной замене направления всех вычислений по горизонтали, т.е. практически к замене знака всех переменных

горизонтальных индексов и пределов их изменений на противоположные. Ниже описан второй этап сшивки лакун, т.е. собственно процедура экстраполяции поля  $W$  в область лакуны по заданному направлению (12).

Процедура экстраполяции состоит в “распространении” значений  $W$ , лежащих внутри базового окна (см. выше), в область лакуны в направлении, указанном вектором (12). Значение  $W$  в каждом из узлов базового окна может дать вклад в несколько значений в узлах лакуны с весовыми коэффициентами, зависящими от расстояния “распространения”. Максимальное расстояние распространения по горизонтали,  $D$ , пропорционально характерному масштабу экстраполяции  $d$

$$D = fd. \quad (13)$$

Как правило, коэффициент  $f$  выбирался равным 1, однако по усмотрению оператора может быть задано другое значение, меньшее 1, например, 0.5 или 0.33. Такой вариант экстраполяции может быть полезен для сглаживания слишком изрезанных границ лакуны и/или уменьшения ее ширины до окончательного заполнения. В этом случае лакуна заполняется после повторной процедуры сшивки с новым значением  $f$ .

Процедура распространения значения  $W_J = W_{x^i, y^j}$  из каждого заполненного узла  $J = (x^i, y^j)$ ,  $w_{x^i, y^j} = -1$  базового окна вправо (на восток) состоит в обновлении значений  $W$  и весовых коэффициентов  $w$  в узлах сетки  $(x^{i+m}, y^{j+n})$ , через которые проходит в направлении (12) вектор, начинающийся в узле  $J$  и имеющий длину горизонтальной компоненты, равную (13). Обновление  $W$  осуществляется прибавлением слагаемого, пропорционального стартовому значению  $W_J$  и “коэффициенту затухания”, определяемому текущим расстоянием распространения

$$\begin{aligned} W_{x^{i+m}, y^{j+n}} &:= \begin{cases} W_{x^{i+m}, y^{j+n}} + W_J \exp(-2m/d), \\ \text{при } w_{x^{i+m}, y^{j+n}} \geq 0, \\ W_{x^{i+m}, y^{j+n}}, \text{ при } w_{x^{i+m}, y^{j+n}} = -1. \end{cases} \\ w_{x^{i+m}, y^{j+n}} &:= \begin{cases} w_{x^{i+m}, y^{j+n}} + \exp(-2m/d), \\ \text{при } w_{x^{i+m}, y^{j+n}} \geq 0, \\ -1, \text{ при } w_{x^{i+m}, y^{j+n}} = -1 \end{cases} \quad (14) \\ n &= [mv_y], \quad m = 1..D. \end{aligned}$$

Как видно из (14), пересчету не подлежат те значения  $W$  в узлах сетки отрицательными весами, т.е. рассчитанные до текущей процедуры сшивки, например, на этапе интерполяции (раздел 2). Индексы  $m$  и  $n$  изменяются согласованно, чтобы направление распространения значения из исходного узла соответствовало вектору (12). Огра-

значение на максимальное распространение задается предельным значением  $m$  (горизонтального сдвига), равным  $D$ . Процедура (14) выполняется при всех допустимых значениях  $m$  для каждого из заполненных узлов  $J$  в пределах базового окна. Аналогичные выражения для распространения значений  $W$  на запад из восточной окрестности лакуны из соображений краткости приведены не будут.

Алгоритм выполняет поиск узлов, принадлежащих западным (5) и восточным границам лакун, последовательно проходя все узлы сетки, и для каждого найденного граничного узла рассчитывает вектор экстраполяции (12) и проводит процедуру распространения значений  $W$ . Только после того, как для всех граничных узлов выполнены эти процедуры, происходит нормировка значений  $W_{x,y}$  в лакунах с учетом накопленных весов  $w_{x,y}$

$$W_{x,y} := \begin{cases} W_{x,y}/w_{x,y}, & \text{при } w_{x,y} > 0, \\ W_{x,y}, & \text{при } w_{x,y} \leq 0. \end{cases} \quad (15)$$

Результат сшивки для фрагмента поля  $W$ , приведенного на рис. 3а, показан на рис. 3б. Если после однократной сшивки некоторые лакуны остаются не до конца заполненными, процедуру можно повторить. Для этого достаточно заново инициализировать массив весовых коэффициентов  $w_{x,y}$ , приравняв их  $-1$  во всех узлах, где они имеют ненулевые значения. Смысл инициализации заключается в том, чтобы установить все вычисленные к этому моменту значения  $W$  (интерполированные и экстраполированные) в качестве исходных (неизменяемых) для следующей процедуры сшивки.

#### 4. СМЕЩЕНИЕ СУТОЧНОГО ПЕРЕХОДА

При построении карт  $W$  по данным, накопленным за суточный интервал измерений, неизбежно возникает ситуация, когда измерения двух соседних скановых полос (соответствующие самому раннему и самому позднему пролетам спутника за сутки) разделяют около 24 ч. Условную линию, проходящую через лакуну, разделяющую эти полосы, будем называть суточной границей, или суточным переходом. Суточный переход часто приходится на критически важные области, например, акваторию Атлантического океана в момент прохождения там тропического циклона. Ясно, что применение процедуры сшивки лакун к окрестности суточного перехода некорректно в связи с быстрой эволюцией поля  $W$ .

Решением проблемы суточного разрыва стало его смещение в область, не представляющую интереса в контексте задачи исследования. В настоящей работе все суточные лакуны были смещены в область над Африкой. С этой целью начала суточных интервалов  $i_{\min}^s$  (см. раздел 2) для формирования карт  $W$  выбирались так, чтобы первая

скановая полоса проходила по западному побережью Африки или чуть восточнее вглубь континента. Соответственно концы суточных интервалов  $i_{\max}^s$  обеспечивали прохождение последней скановой полосы над восточной Африкой.

К посуточно сгруппированным таким образом данным SSM/I применялась сначала процедура интерполяции на регулярную сетку (раздел 2), а затем процедура сшивки лакун (раздел 3). При этом лакуна, соответствующая суточному переходу, приходилась на область над Африкой. Поскольку формально рассчитанные над континентами значения поля  $W$  не имели физического смысла и в дальнейшем исключались из анализа, сшивка лакун суточного перехода над Африкой не влияла на качество получаемых глобальных карт и осуществлялась одновременно со сшивкой других лакун из соображений алгоритмической простоты.

#### 5. ЗАПОЛНЕНИЕ ПРОПУСКОВ ДАННЫХ

В ряде случаев из-за сбоя, технических пауз в работе приборов и т.п. на суточных картах  $W$  образуются области “разрывов” скановых полос, не заполненные данными измерений (рис. 4а на цветн. вклейке). Можно предложить два подхода к восполнению данных в этих областях с использованием описанных в разделах 2, 3 методик интерполяции и экстраполяции: привлечение дополнительной спутниковой информации и/или сшивка лакун.

Привлечение дополнительных спутниковых данных алгоритмически тривиально: оно соответствует расширению набора индексов  $s$  массивов данных  $W_i^s$ . Однако на практике такое расширение не всегда полезно как из-за возможного отсутствия данных в нужной области, так и вследствие указанной выше проблемы асинхронности измерений (рис. 2а).

С другой стороны, поскольку ширина незаполненной области, как правило, равна ширине скановой полосы и значительно превышает среднюю ширину лакуны, то ее заполнение экстраполяцией данных может потребовать многократного применения процедуры сшивки, либо сшивки с большим коэффициентом  $f$  (13). При этом могут образовываться характерные для методик экстраполяции артефакты: резкие “стыки”, сдвиговые искажения, накопление ошибок и т.д.

Сравнительно малое число случаев существенных пропусков данных в измерениях SSM/I не позволило к настоящему моменту выработать универсальный подход к решению проблемы разрыва скановой полосы. На практике в каждом подобном случае был проведен специальный анализ результатов применения каждого из подходов, и оптимальное решение выработывалось методом

проб и ошибок. На рис. 4а показано, что в заданной области наблюдения в эти сутки измерения со спутника F13 имеют приемлемую синхронизацию с измерениями с F14 и F15. Конфигурацию скановых полос спутников иллюстрирует рис. 4б. 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. Карта  $W$ , полученная в результате такого комплексного подхода, содержит заметные артефакты обработки (рис. 4в), однако в отличие от исходной вполне пригодна для использования в алгоритме пространственно-временной интерполяции.

## 6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Набор описанных выше алгоритмов был программно реализован и опробирован при обработке данных SSM/I спутников F13, F14 и F15, полученных за период наблюдений 28.07.2000–26.08.2000 гг. (включающий ТЦ Alberto). С его использованием были построены опорные спутниковые карты интегрального паросодержания атмосферы  $W$  с пространственным разрешением  $0.2^\circ$ . Для каждого суток наблюдений удалось построить по две такие карты (разделенные интервалом времени около 12 ч): по отдельности на восходящих и нисходящих витках спутников. При этом в основном были использованы данные спутников F14 и F15 вследствие лучшей согласованности по времени их измерений (их ближайшие витки пересекали экватор с разницей во времени меньше минуты). В некоторых случаях требовалось привлечение данных спутника F13. В терминах раздела 1 для верхнего индекса  $s$  были выбраны в качестве оптимальных следующие последовательности:  $s = \{F14A, F15A\}$  на интервалах наблюдений 28.07.2000–11.08.2000, 14.08.2000–16.08.2000, 23.08.2000–24.08.2000 и  $s = \{F14A, F15A, F13A\}$  на интервалах 12.08.2000–13.08.2000, 17.08.2000–22.08.2000 и 25.08.2000–26.08.2000, а также  $s = \{F14D, F15D\}$  на интервалах 28.07.2000–12.08.2000, 25.08.2000 и  $s = \{F14D, F15D, F13D\}$  на интервалах 13.08.2000–24.08.2000, 16.08.2000. При построении суточных карт  $W$  с использованием информации спутника F13 привлекались, как правило, данные с одного, реже – двух витков для компенсации наиболее существенных разрывов скановых полос.

К полученным опорным картам  $W$  (шаг по времени 12 ч) была применена пространственно-временная интерполяция по методике (Ермаков и др., 2011). В результате получили анимационный продукт, составленный из последовательности карт поля  $W$  с дискретизацией по времени 1.5 ч при полном покрытии поверхности Земли с пространственным разрешением  $0.2^\circ$ . Фрагмент последова-

тельности полученных карт приведен на рис. 5 (на цветн. вклейке). Это 16 кадров, отражающих эволюцию поля  $W$  по измерениям за 11.08.2000 с шагом по времени 1.5 ч. Для экономии места показан только широтный пояс в диапазоне от  $70^\circ$  с.ш. до  $40^\circ$  ю.ш. Кадры пронумерованы в хронологическом порядке.

На полученных картах  $W$  достигнута гораздо более высокая детализация пространственных особенностей и кинематики поля  $W$ , чем при использовании данных SSM/I в формате GRID в качестве опорных карт (Ермаков и др., 2012б). Предварительное сравнение с результатами обработки спутниковых микроволновых данных по альтернативным методикам (Wimmers, Velden, 2011) показывает, что достигнутые параметры дискретизации обеспечивают получение анимационного продукта аналогичного уровня качества (несколько уступающего по временной дискретизации, но превосходящего по пространственному разрешению). Более глубокое изучение альтернативных продуктов, открытых для свободного использования (см., например, <ftp://ftp.ssec.wisc.edu/pub/incoming/nadine.mp4>), позволяет даже предположить, что проблема рассогласованности измерений во времени, порождающая характерные “нестыковки” фрагментов карт, аналогичные представленным на рис. 2а, проявляется в этих продуктах значительно чаще, чем это имеет место в продукте, сгенерированном по представленному выше алгоритму. Выбор в качестве фокуса исследования периода июль–август 2000 г., связанный с исследованием сложной эволюции ТЦ Alberto, не позволил провести прямого сопоставления с анимационным продуктом, построенным по методике (Wimmers, Velden, 2011). Авторы планируют в дальнейшем обработку больших объемов доступных данных SSM/I, в том числе для перекрестного сравнения получаемых результатов с альтернативными анимационными продуктами.

Важной особенностью представленного авторами продукта является тот факт, что расчет анимированной карты производится для всей акватории Мирового океана, а не в локальном (ядро циклона) или региональном (отдельная акватория) масштабе. Это дает принципиальную возможность для исследования глобального тропического циклогенеза как единого процесса.

Еще одной существенной особенностью предложенной анимационной методики является минимум модельных предположений, сведенных к общей кинематической модели оценки и компенсации движения. Отсутствие прописанной в модели в явном виде связи между законами, действующими в системе океан–атмосфера, и принятыми правилами интерполяции может рассматриваться как недостаток интерполяционной схемы. Однако цитированные выше работы свидетельствуют, что

корректный учет таких законов даже при принятых ограничениях на детальность карт  $W$  в настоящее время невозможен: частично приходится прибегать к подгонке параметров эмпирических связей, и даже это не снимает полностью проблем рассогласованности отдельных фрагментов получаемых карт по времени. В то же время отсутствие в расчетной схеме “произвольно навязанных” правил интерполяции позволяет, по мнению авторов настоящей работы, с большей эффективностью оценивать результаты моделирования и отделять артефакты обработки от реально наблюдаемых эффектов. Здесь следует отметить также важное достоинство предложенного алгоритма, заключающееся в замкнутости расчетной схемы относительно входных интерполируемых данных. Качество конечного продукта целиком определяется объемом и качеством спутниковых микроволновых данных и не зависит от наличия и доступности данных иных спутниковых измерений или результатов сторонних модельных расчетов.

Отметим также, что в связи с необходимостью повышения пространственного разрешения и получением данных о вертикальном распределении водяного пара ведутся методические и расчетные работы по возможному созданию радиотепловых систем нового поколения с использованием линий излучения 22, 183 и 325 ГГц (Семин и др., 2012; 2013) и, таким образом, с получением одновременных данных по интегральному содержанию водяного пара и по его высотному профилю, что обеспечит в будущем пространственно-временную информацию как о скрытом энергозапасе, так и о степени близости атмосферной системы к критическим состояниям. Поскольку моделирование приобретает в этом случае многомерный характер, то дальнейшая модернизация и оптимизация настоящего алгоритма становится насущной задачей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен алгоритм построения пар (по одной на восходящих и нисходящих витках) глобальных ежесуточных спутниковых карт поля интегрального паросодержания атмосферы  $W$  с пространственным разрешением  $0.2^\circ$ . В комплексе с предложенной авторами ранее методикой пространственно-временной интерполяции он дает возможность построения анимированной карты  $W$  с шагом по времени 1.5 ч при указанном пространственном разрешении и полном покрытии поверхности Земли. Развиваемый анимационный подход успешно применяется при решении тематических задач дистанционного зондирования Земли, в частности, при анализе эволюции тропических циклонов.

Помимо самостоятельной ценности предлагаемого подхода, авторы считают важным подчерк-

нуть необходимость развития различных анимационных методик для дальнейшего сопоставления и контроля качества продуктов, полученных при применении каждой из них, и, потенциально, для комплексирования их результатов в задачах исследования быстрых энергоемких процессов системы океан–атмосфера, в частности, процессов зарождения, интенсификации и диссипации ТЦ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ермаков Д.М., Раев М.Д., Суслов 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: физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. 2011. Т. 8. № 3. С. 9–16.
- Ермаков Д.М., Чернушич А.П., Шарков Е.А., Покровская И.В.* Поиск источника энергии при интенсификации ТЦ Katrina по данным микроволнового спутникового зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2012а. № 4. С. 47–56.
- Ермаков Д.М., Чернушич А.П., Шарков Е.А.* Детализация фаз развития ТЦ Katrina по интерполированным глобальным полям водяного пара // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. 2012б. Т. 9. № 2. С. 207–213.
- Ростовцева В.В., Гончаренко И.В.* Временная и пространственная статистика температурно-влажностного критерия зарождения тропических циклонов по данным спутниковой микроволновой радиометрии // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 4. С. 32–40.
- Семин А.Г., Кузьмин А.В., Хапун Ю.Б., Шарков Е.А.* О возможности восстановления вертикального распределения водяного пара в атмосфере тропиков по измерениям в линии 183 ГГц из космоса // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 2. С. 41–52.
- Семин А.Г., Кузьмин А.В., Хапун Ю.Б., Шарков Е.А.* Использование резонансных линий 22.2, 183 и 325 ГГц для восстановления детальных вертикальных профилей водяного пара в тропической атмосфере // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 1. С. 3–8.
- Шарков Е.А.* Дистанционные исследования атмосферных катастроф // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 1. С. 52–68.
- 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: физические основы, методы и технологии мониторинга окружаю-

шей среды, потенциально опасных явлений и объектов. 2011. Т. 8. № 3. С. 310–316.

*Richardson I.E.G.* H.264 and MPEG-4 video compression. Chichester: John Wiley and Sons, 2003. 306 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. The 2nd Edition. B., Heidelberg, L., N.Y. etc.: Springer/PRAXIS, 2012. 650 p.

*Wimmers A.J., Velden C.S.* MIMIC: A new approach to visualizing satellite microwave imagery of tropical cyclones // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2007. V. 88. № 8. P. 1187–1196.

*Wimmers A.J., Velden C.S.* Seamless advective blending of total precipitable water retrievals from polar-orbiting satellites // *J. Appl. Meteor. Climatol.* 2011. V. 50. № 5. P. 1024–1036.

## **An Algorithm for Construction of Global Ocean-Atmosphere Radiothermal Fields with High Spatiotemporal Sampling Based on Satellite Microwave 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>**

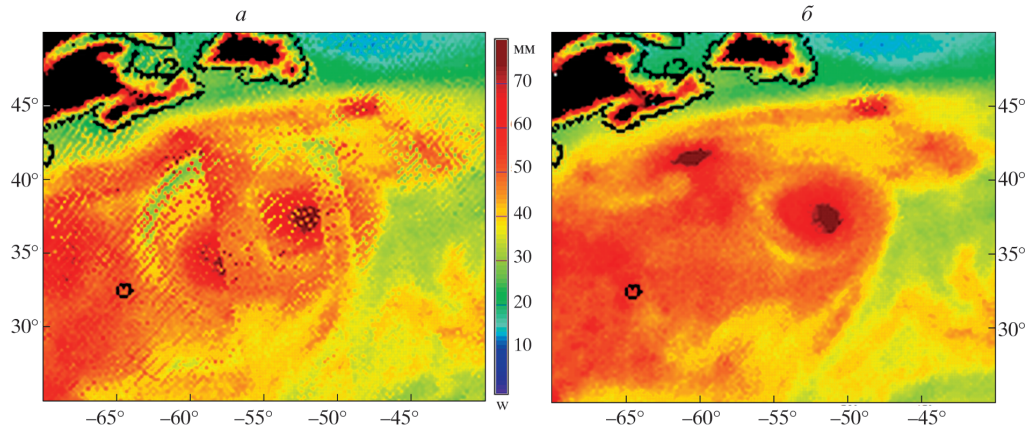
<sup>1</sup> *Institute of Radioengineering and Electronics, Russian Academy of Sciences, Fryazino, Moscow Region*

<sup>2</sup> *Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow*

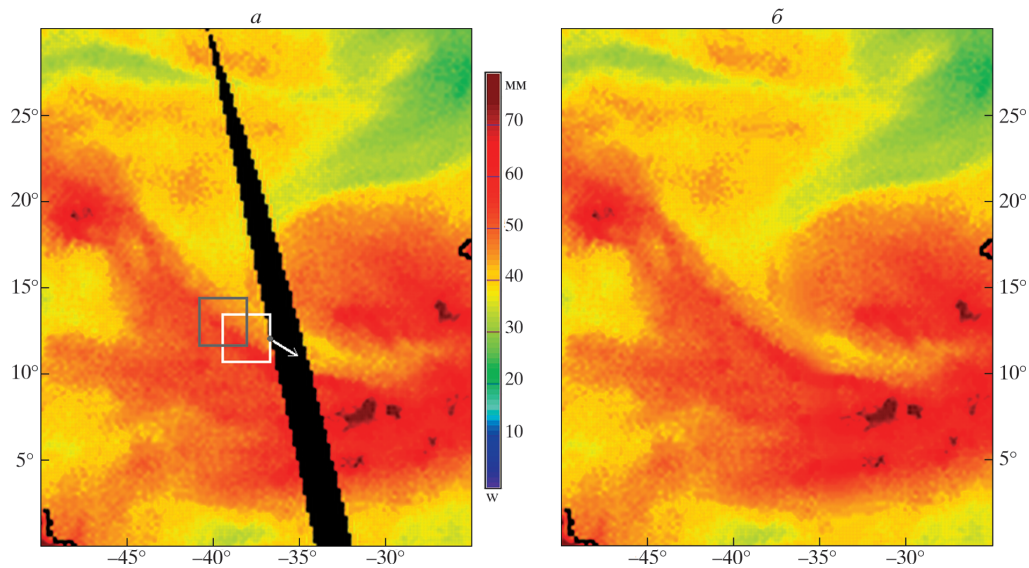
In the paper an algorithm is presented for constructing global ocean-atmosphere radiothermal fields with high spatiotemporal sampling by satellite microwave measurements. Attention is focused on the construction of the daily reference images of high spatial resolution. The construction of such reference maps is an important preparatory step for the further application of the earlier proposed and implemented authors' technique of spatiotemporal interpolation. The software developed, which implements the described algorithm, allows obtaining global animated radiothermal field with time step of 1.5 hours and spatial resolution of 0.2°. The achieved parameters are essential for the analysis of complex, fast and energy-intensive processes occurring in the ocean-atmosphere system, like, in particular, the formation and evolution of tropical cyclones.

**Keywords:** satellite microwave radiometry, total precipitable water global fields, spatiotemporal interpolation

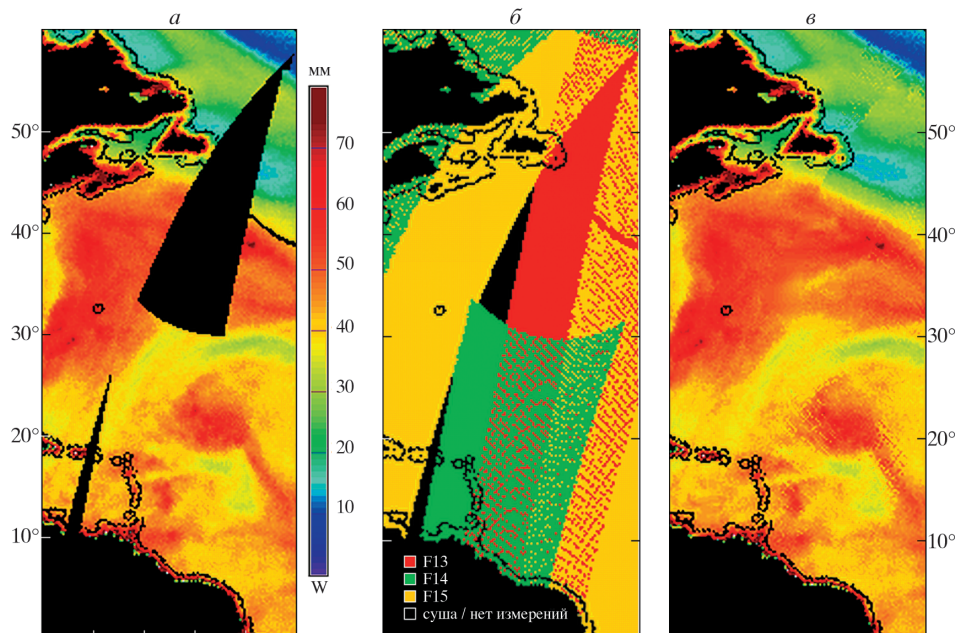




**Рис. 2.** Влияние асинхронности изменений при совместной интерполяции: *а* – данных спутников F13, F14, F15; *б* – данных спутников F14, F15 (см. пояснения в тексте).



**Рис. 3.** Сшивка лагун: *а* – расчет вектора экстраполяции; *б* – результат экстраполяции (см. пояснения в тексте).



**Рис. 4.** Восполнение пропусков данных: *а* – разрыв скановой полосы спутника F14; *б* – конфигурация полос спутников F13, F14, F15; *в* – дополнение карты на рис. 4а данными спутника F13 (см. пояснения в тексте).





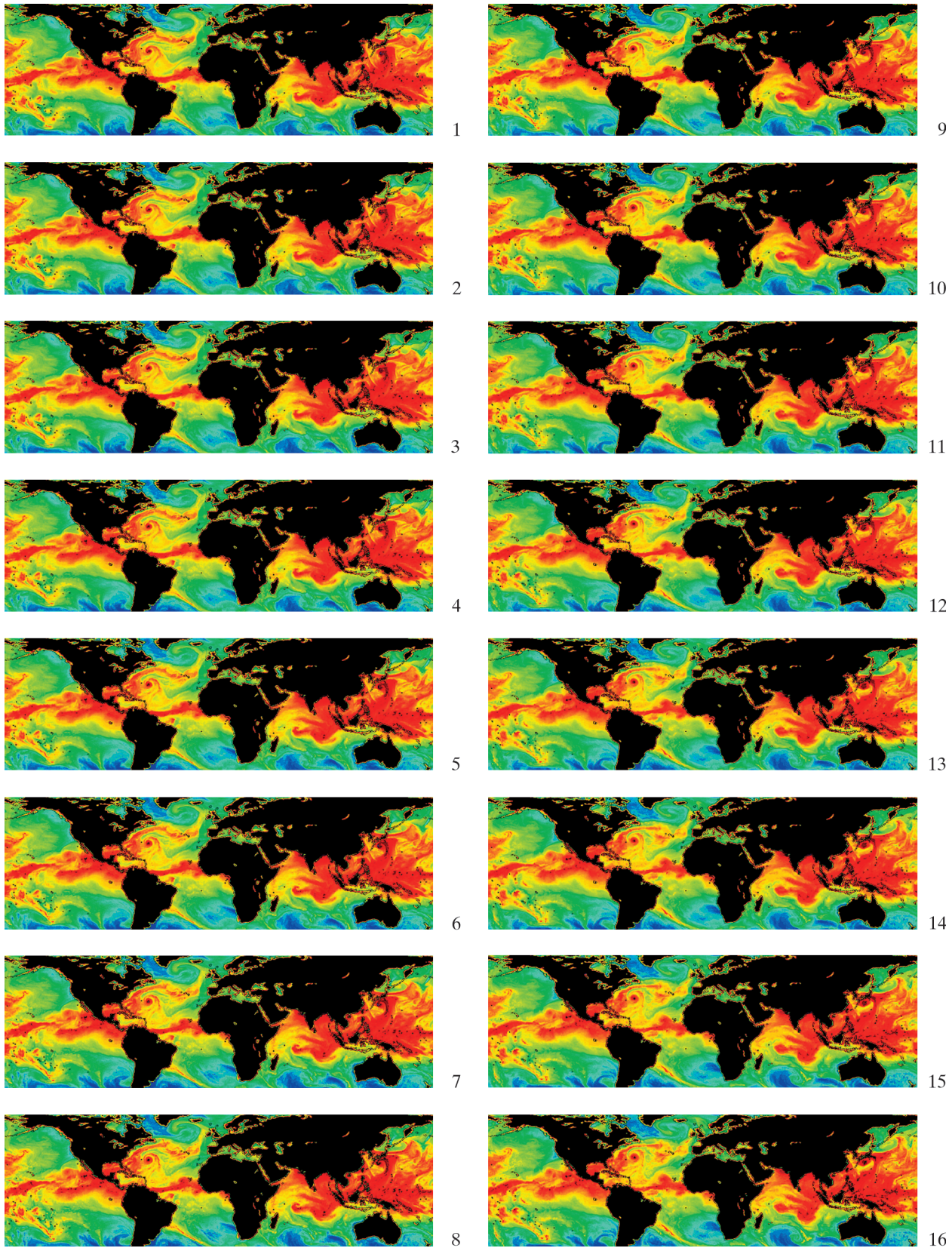


Рис. 5. Кадры (1–16) анимированной карты *W* за 11.08.2000 (фрагменты в широтном поясе от 70° с.ш. до 40° ю.ш.). Шаг по времени 1.5 ч. Цветочная шкала – как на рис. 2–4.

