

## Оценка точности интерполяционной схемы спутникового радиотепловидения

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

Выполнена оценка точности интерполяционной схемы спутникового радиотепловидения на основе анализа стандартных продуктов: полей интегрального паросодержания атмосферы, восстановленных по данным глобальных месячных измерений приборами SSMIS на спутниках DMSP F16, F17, а также прибором AMSR-2 на спутнике GCOM-W1. Проанализирована представительная выборка данных на базе длительной серии измерений всеми указанными приборами в ноябре 2013 года. Общий объем выборки составил порядка  $10^7$  независимых измерений, равномерно распределенных над всеми акваториями Мирового океана. Путем сопоставления с оценками точности альтернативной интерполяционной схемы, известной в мировой практике, показано высокое качество интерполяции, достигнутое в подходе спутникового радиотепловидения. При сравнении однородных рядов данных на основе измерений SSMIS средняя погрешность пространственно-временной интерполяции значений интегрального паросодержания составляет 0,8 мм. При перекрестном сравнении с продуктами AMSR-2 погрешность несколько возрастает, оставаясь вполне удовлетворительной для решения широкого ряда практических задач. Более детальный анализ путем аппроксимации распределений невязок функциями Гаусса и Коши-Лоренца дополнительно подтверждает высокое качество работы интерполяционной схемы. Обсуждены некоторые возможности дальнейшего развития и применения подхода спутникового радиотепловидения.

**Ключевые слова:** точность интерполяции, спутниковое радиотепловидение

### Введение

Авторский подход к анализу длинных рядов спутниковых данных как динамических полей впервые сформулирован в (Ермаков и др., 2007) и развит в работах (Ермаков и др., 2011, 2013а). Подход позволяет детализировать стадии быстрых процессов в системе океан-атмосфера Земли по данным спутниковых измерений (Ermakov et al., 2013а, 2013b) и исследовать в динамике их эволюцию с высоким пространственно-временным разрешением, в том числе рассчитывая их интегральные, физически значимые характеристики, такие как адвективные потоки скрытого тепла через заданные границы (Ермаков и др., 2014а, 2014б). Поскольку обмен скрытым теплом является важным, а зачастую – определяющим фактором энергетического баланса в системе океан-атмосфера Земли (Palmen, Newton, 1969; Sharkov, 2011), расчет потоков скрытого тепла чрезвычайно важен при анализе и прогнозе зарождения и развития многих атмосферных процессов. Так, при исследовании тропического циклогенеза спутниковое радиотепловидение обеспечивает выполнение уникальных оценок адвекции скрытого тепла, синхронизированных с независимыми данными об интенсивности тропического циклона, напрямую из радиотепловых спутниковых измерений (Ермаков и др., 2014в).

Возможность получения количественных оценок поднимает естественный вопрос о точности радиотепловизионного анализа, которая непосредственно определяется точностью применяемой в нем схемы пространственно-временной интерполяции. Этому вопросу

посвящено настоящее исследование. В работе описаны методика и критерий оценки точности интерполяции, дана характеристика использованной для анализа выборки спутниковых данных, приведены результаты расчетов в сопоставлении с результатами (Wimmers, Velden, 2011), далее – (WV, 2011).

## 1. Методика оценки точности интерполяции

Во многих случаях глобальные суточные поля некоторого геофизического параметра  $W$  могут быть получены по данным как минимум двух независимых серий спутниковых микроволновых измерений,  $A$  и  $B$ . Будем обозначать такие «исходные» поля  $W^A$  и  $W^B$  и считать, что такие «исходные» поля построены на некоторой регулярной географической сетке. Узлы этой сетки можно занумеровать по некоторому правилу, и значения полей  $W^A$  и  $W^B$  в одном и том же узле  $i$  обозначать как  $W_i^A$  и  $W_i^B$  соответственно.

Для заданных суток наблюдений разность

$$\delta_i = W_i^A - W_i^B \quad (1)$$

будет, вообще говоря, отлична от нуля по двум основным причинам. Во-первых, из-за погрешностей восстановления полей  $W$  и индивидуальных особенностей измерений разными приборами и, во-вторых, из-за естественных изменений, произошедших в поле  $W$  в промежутке времени  $\Delta t$  между измерениями этими приборами. В случае солнечносинхронных орбит время  $\Delta t$  примерно постоянно для всех узлов сетки и определяется местным временем восходящих (нисходящих) узлов двух спутников. Спутниковое радиотепловидение позволяет осуществить пространственно-временную интерполяцию поля  $W$  (например, на основе исходных данных  $W^A$ ) с шагом по времени до 1,5 часов и, таким образом, для каждого узла  $i$  подобрать значение  $W_i^A(t)$ , максимально «синхронизированное» с соответствующим значением  $W_i^B$ . При этом абсолютная величина разности (1) должна уменьшиться за счет минимизации  $\Delta t$  (до 45 минут и менее). Однако возникают дополнительные ошибки интерполяции, которые могут сказываться в сторону увеличения разности (1).

В качестве интегрального критерия отличия интерполированного поля  $W_i^A(t)$  от независимо полученного  $W_i^B$  при фиксированном значении  $\Delta t$  можно использовать среднюю величину модуля  $\delta_i$  по всем узлам сетки (и более широко – по всем  $N$  измерениям длительной серии):

$$e_\delta(\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\delta_i|. \quad (2)$$

Исследование величины  $e_\delta$  как функции  $\Delta t$  в суточном интервале позволяет проанализировать «синхронизирующее» влияние пространственно-временной интерполяции дан-

ных, т.е. (ожидаемое) уменьшение  $e_\delta$  по мере уменьшения модуля  $\Delta t$ . В то же время, значение  $e_\delta$  при минимальном (по модулю) достижимом значении  $\Delta t$  является естественной мерой точности пространственно-временной интерполяции. Аналогичный подход и тот же критерий точности интерполяции принят в работе (WV, 2011) и использован в настоящей работе для простоты сопоставления. Кроме того, в работе выполнена аппроксимация распределений  $\delta_i$  при разных  $\Delta t$  функциями Гаусса

$$g(x) = A \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

и Коши-Лоренца

$$f(x) = A \frac{\gamma}{(x-\mu)^2 + \gamma^2} \quad (4)$$

для оценки их симметричности, наличия систематической погрешности и вероятности возникновения существенных ошибок интерполяции.

## 2. Характеристика входных данных

В качестве основных рядов данных в исследовании были использованы стандартные продукты компании Remote Sensing Systems (RSS), а именно суточные поля  $W$  интегрального паросодержания атмосферы, восстановленные по измерениям приборами SSMIS со спутников F16, F17 серии DMSP в ноябре 2013 года. При этом данные SSMIS F16, дополненные незначительным объемом данных SSMIS F17 для частичного заполнения лакун, см. (Ермаков и др., 2013а), были подвергнуты пространственно-временной интерполяции. В результате были получены глобальные поля  $W$  на стандартной сетке RSS с шагом  $0,25^\circ$  и шагом по времени 1,5 часа. Расхождение по времени между измерениями SSMIS F16 и SSMIS F17 в ноябре 2013 года составляло около 1 часа, в результате наилучшая «синхронизация» интерполированных данных F16 и исходных F17 составила  $\Delta t = 30$  минут.

При сравнительно небольшом расхождении во времени исходных измерений F16 и F17 их наилучшая «синхронизация» происходила при интерполяции данных F16 на один временной шаг в 1,5 часа. В результате анализ точности интерполяции по методике, описанной выше, оставлял открытым вопрос накопления ошибок интерполяции на более длительных интервалах времени. Чтобы убедиться, что минимум ошибки (2) достигается при наилучшей синхронизации рядов данных, к анализу были дополнительно привлечены стандартные продукты обработки данных AMSR-2, а именно – поля интегрального паросодержания атмосферы. Исходные значения параметра  $W$  были рассчитаны в JAXA на исходной сетке измерений по отдельности на каждом витке орбиты GCOM-W1. В работе все данные на исследованном интервале времени в ноябре 2013 г. были предварительно приведены к регулярной сетке с шагом  $0,25^\circ$ . Временное расхождение измерений SSMIS F16 и AMSR-2 составило в ноябре 2013 года около 4 часов,

что позволило надежно исследовать вопрос о накоплении ошибок на нескольких шагах интерполяции по времени.

При сопоставлении полей  $W$  по данным AMSR-2 с интерполированными полями SSMIS F16 следует принять во внимание наличие дополнительных факторов, увеличивающих ошибку (2) и не устранимых интерполяцией: различия характеристик измерительных приборов, параметров орбиты и методов калибровки и восстановления значений  $W$ . В этой части исследования интерес представляли прежде всего: средняя величина ошибки (2) для не интерполированных данных SSMIS и AMSR-2 (поскольку в комплексных исследованиях данные различных спутниковых приборов зачастую используются совместно без предварительной интерполяции); качественное влияние интерполяции, т.е. изменение ошибки (2) по мере синхронизации данных; а также величина ошибки, достигаемая при наилучшей синхронизации.

Следует отметить, что для выбранного интервала времени доступны и другие ряды данных, в частности, продукты RSS, построенные по данным SSM/I спутника F15. Однако специалисты RSS установили, что точность этих данных, начиная с августа 2006 года значительно ухудшилась. Поэтому в настоящей работе не приводится подробный анализ с использованием этих данных. Некоторые краткие замечания сделаны в заключение раздела обсуждения результатов.

### 3. Сопоставление с мировым аналогами

Как отмечено во введении, принятая в работе методика оценки и критерий точности интерполяции полностью аналогичны принятым в (WV, 2011). При этом и основные спутниковые продукты (поля  $W$ , построенные RSS на сетке  $0,25^\circ$ ) использованы в обеих работах. Поэтому полученные результаты позволяют непосредственное сравнение. Нужно лишь отметить важную особенность, связанную с принятой в (WV, 2011) схемой интерполяции. В соответствии с этой схемой разные группы данных приходится экстраполировать на различные временные интервалы, объединяя затем результаты для достижения полного покрытия расчетной сетки. Временные интервалы экстраполяции зависят от взаимной конфигурации спутниковых орбит и времен измерений, а также от ветровых полей во всей атмосфере и не могут быть определены заранее. По данным авторов в среднем эти интервалы составляют от 0 (без экстраполяции) до 7 часов, что дает диапазон результирующей точности (2) интерполяции  $W$  от 0,5 мм до 2,0 мм. При этом минимальная ошибка 0,5 мм соответствует случаю без экстраполяции, т.е. определяется погрешностями восстановления  $W$ , заложенными в исходные данные. Расчет ошибки (2) как функции  $\Delta t$  (см. Раздел 1) в цитируемой работе произведен с шагом 1 час. Авторы делают вывод об удовлетворительной результирующей точности интерполяции (0,5–2,0 мм) для широкого класса практических задач.

В отличие от цитируемой работы в настоящей работе использована интерполяционная схема спутникового радиотепловидения (Ермаков и др., 2014г), обеспечивающая однород-

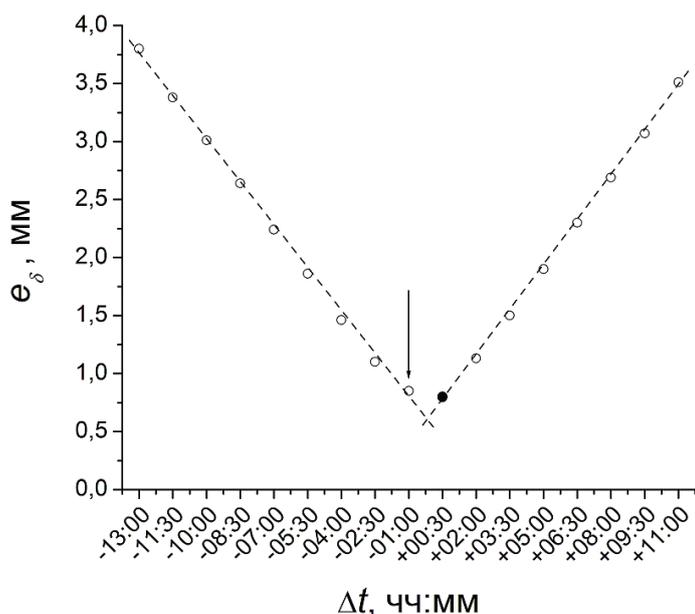
ную интерполяцию по времени для всех узлов расчетной сетки. Поэтому результирующая точность интерполяции определяется конкретной величиной (2), достигаемой при наилучшей «синхронизации» интерполированных и независимо полученных полей  $W$ , т.е. при минимальном абсолютном значении  $\Delta t$ .

Отметим также, что в обеих работах использованы достаточно представительные, сравнимые по объему выборки данных, составившие порядка  $10^7$  пар интерполированных и независимо восстановленных значений  $W$  на расчетной сетке глобального покрытия.

#### 4. Обсуждение результатов

На *рис. 1* показаны результаты расчета ошибки интерполяции  $e_\delta$  как функции  $\Delta t$  для случая рядов данных по измерениям SSMIS F16 и F17. Отрицательные значения  $\Delta t$  соответствуют случаям интерполяции данных F16 на более ранние моменты времени, чем время измерения F17 в соответствующих узлах сетки. Наилучшая синхронизация рядов данных обеспечивается при значении  $\Delta t = +0,5$  часа. Значение  $\Delta t = -1$  час, обозначенное на *рис. 1* вертикальной стрелкой, соответствует временному интервалу между реальными (ближайшими по времени) измерениями F16 и F17.

Отметим следующие основные особенности  $e_\delta$ . Во-первых,  $e_\delta$  как функция  $\Delta t$  демонстрирует близкое к линейному убывание одновременно с убыванием модуля  $\Delta t$ . На рассмотренном интервале  $\pm 12$  часов значения  $e_\delta$  лежат в диапазоне 0,8–4,0 мм. Обе эти особенности хорошо согласуются с результатами, полученными в (WV, 2011) и, в частности, показанными на графике *рис. 8* цитируемой работы (здесь не воспроизведенном).

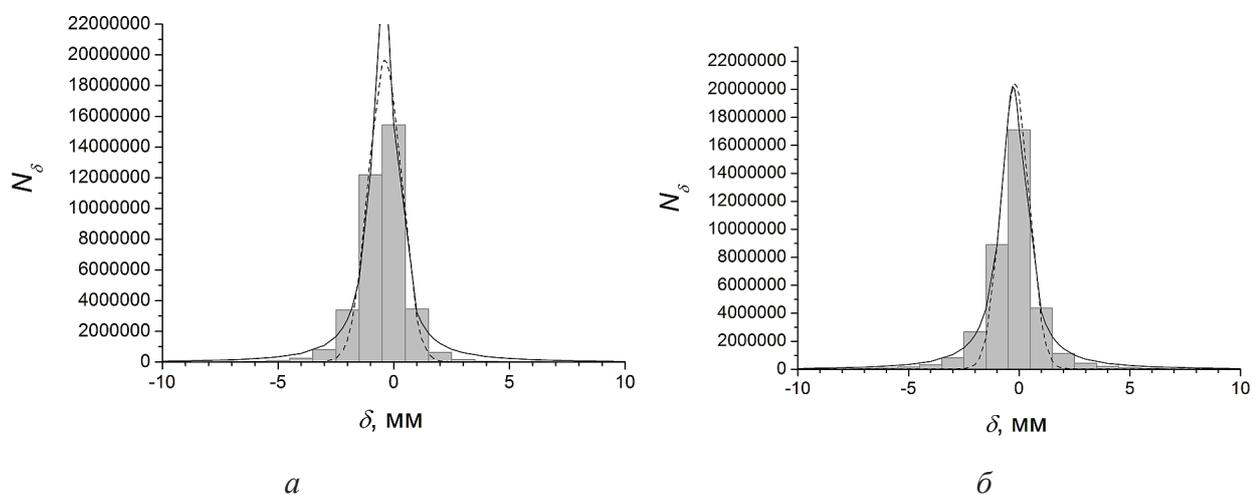


*Рис. 1. Средняя ошибка интерполяции полей интегрального паросодержания атмосферы по данным SSMIS F16 как функция «синхронизации» с независимыми данными SSMIS F17, см. Раздел 4*

Кроме того, важно отметить, что минимальное значение  $e_\delta$  достигается при минимальном по модулю значении  $\Delta t$ , а прямые, аппроксимирующие две группы значений  $e_\delta$  при положительных и отрицательных  $\Delta t$ , сходятся при  $\Delta t$ , близком к 0 (пунктирные линии на *рис. 1*). Все это свидетельствует в пользу адекватности описания эволюции поля  $W$  принятой интерполяционной схемой в промежутках между моментами спутниковых наблюдений. Как указано выше, интегральной мерой погрешности принятой схемы интерполяции следует считать величину  $e_\delta$ , вычисленную для минимального по модулю  $\Delta t$ . Эта величина на исследованной выборке данных составила 0,8 мм (*рис. 1*, черный кружок), что лежит внутри интервала 0,5–2,0 мм, и очень близка к предельно достижимому значению 0,5 мм, определяемому ошибками в исходных данных. Она, в частности, меньше, чем та же величина, вычисленная для неинтерполированных данных F16 и F17 (0,85 мм), а также меньше погрешностей 1,0–1,2 мм схемы (*WV*, 2011), возникающих при экстраполяции исходных данных на минимальный рассмотренный в цитированной работе часовой временной интервал вперед или назад (*рис. 8* указанной работы).

На *рис. 2* показаны распределения всей совокупности невязок  $\delta_i$  (1) значений  $W$ , восстановленных по данным F17 и данным F16 для случаев а)  $\Delta t = +0,5$  часа (данные максимально «синхронизованы») и б)  $\Delta t = -1$  час (данные не интерполированы) в виде гистограммы числа случаев  $N_\delta$ , в которых невязка составила величину  $\delta$  мм. Распределения имеют ярко выраженный мономодальный характер и практически симметричны. Они с высокой точностью могут быть приближены функциями Гаусса (3) и Коши-Лоренца (4). Соответствующие параметры аппроксимации можно рассматривать как оценку систематической ( $\mu$ ) и случайной ( $\sigma$ ,  $\gamma$ ) погрешности интерполяции, имея в виду, что свой вклад в них вносят и исходные ошибки восстановления  $W$ .

Близость среднего значения (параметра сдвига) к 0 и, в особенности, малые отличия этих значений (около 0,2 мм) для рассмотренных случаев свидетельствуют об отсутствии су-



*Рис. 2. Распределение невязок интерполяции для случаев а)  $\Delta t = +0,5$  часа и б)  $\Delta t = -1$  час; аппроксимация функциями Гаусса (пунктир) и Коши-Лоренца (сплошная линия)*

щественной систематической погрешности интерполяции. Узость распределения (значение среднеквадратичного разброса  $\sigma$ , параметра масштаба  $\gamma$ ) еще раз показывает общую высокую точность интерполяции. Исходя из полученных параметров распределений (3), (4) можно дать оценку вероятности возникновения значительных невязок (1) в отдельных узлах расчетной сетки. В *табл. 1* резюмированы результаты проведенного анализа: значения среднего (параметра сдвига)  $\mu$ , среднеквадратичного отклонения  $\sigma$  (параметра масштаба  $\gamma$ ), критериев  $R^2$  качества аппроксимации. Кроме того, с использованием аппроксимаций распределения функциями (3), (4) на отрезке  $|\delta_i| \leq 75$  мм численно оценены величины  $\delta_{0,95}$  и  $\delta_{0,99}$ , которые не превышает абсолютное значение невязки в 95% (99%) случаев (аналоги квантилей распределения) для  $\Delta t = +0,5$  часа и  $\Delta t = -1$  час. Полученные величины (см. *табл. 1*) при аппроксимации функцией Коши-Лоренца (4) лежат внутри соответствующих интервалов значений, полученных в (WV, 2011): 3–7 мм погрешности для 95% случаев и 5–12 мм для 99% случаев, а при аппроксимации функцией Гаусса даже оказываются значительно ниже.

Таблица 1. Характеристики распределения невязок интерполяции

$\Delta t$ , час	Аппроксимация функцией Гаусса (3)					Аппроксимация функцией Коши-Лоренца (4)				
	$\mu$ , мм	$\sigma$ , мм	$R^2$	$\delta_{0,95}$ , мм	$\delta_{0,99}$ , мм	$\mu$ , мм	$\gamma$ , мм	$R^2$	$\delta_{0,95}$ , мм	$\delta_{0,99}$ , мм
+0,5	-0,39	0,83	0,994	1,7	2,6	-0,44	0,56	0,996	4,2	8,6
-1,0	-0,18	0,74	0,986	1,5	2,4	-0,27	0,64	0,998	4,7	9,5

Следует отметить, что функция Коши-Лоренца (4) несколько лучше описывает края распределения  $\delta_i$  (см. *рис. 2* и *табл. 1*). Возможное объяснение состоит в том, что в результате предварительной обработки данных в RSS, включающей сложные процедуры калибровки, значения невязок  $\delta_i$  (разностей  $W^{F16}$  и  $W^{F17}$ ) перестают быть нормально распределенными величинами, а вместо этого характер нормального распределения принимает величина, зависящая от отношения  $W^{F16}$  и  $W^{F17}$ .

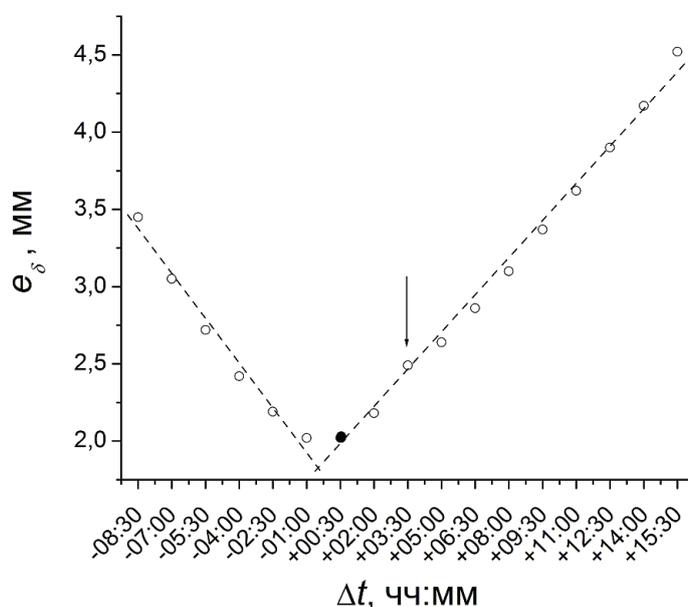
Отметим также, что указанные свойства распределения  $\delta_i$  сохраняются и при значениях  $\Delta t$ , отличных от рассмотренных. При этом лишь возрастает ширина распределения. В качестве иллюстрации этого факта в *табл. 2* приведены соответствующие значения параметра сдвига  $\mu$  (положение максимума), параметра масштаба  $\gamma$  (меры ширины) и качества аппроксимации (критерий  $R^2$ ) распределения Коши-Лоренца (4) для ряда значений  $\Delta t$ . Из таблицы видно, что параметр  $\gamma$  («полуширина» распределения) монотонно убывает до 0,56 мм при приближении к значению  $\Delta t = +0,5$  часа с обеих сторон. При этом центр распределения

Таблица 2. Параметры аппроксимации распределения невязок функцией Коши-Лоренца

$\Delta t$ , час	-8,5	-7,0	-5,5	-4,0	-2,5	-1,0	+0,5	+2,0	+3,5	+5,0	+6,5	+8,0
$\mu$ , мм	-0,37	-0,37	-0,39	-0,39	-0,43	-0,27	-0,44	-0,35	-0,31	-0,22	-0,22	-0,16
$\gamma$ , мм	1,83	1,55	1,29	1,05	0,80	0,64	0,56	0,89	1,13	1,39	1,66	1,94
$R^2$	0,994	0,996	0,995	0,996	0,996	0,998	0,996	0,997	0,997	0,998	0,997	0,997

(параметр  $\mu$ ) колеблется в узком диапазоне значений от  $-0,44$  до  $-0,16$  мм ( $-0,27$  мм для не интерполированных данных). Существенного вклада ошибок интерполяции в систематическую погрешность восстановления  $W$  нет.

На *рис. 3* показаны результаты расчета ошибки интерполяции  $e_s$  как функции  $\Delta t$  для случая рядов данных по измерениям SSMIS F16 и AMSR-2. Отрицательные значения  $\Delta t$  соответствуют случаям интерполяции данных SSMIS на более ранние моменты времени, чем время измерения AMSR2 в соответствующих узлах сетки. Наилучшая синхронизация рядов данных обеспечивается при значении  $\Delta t = +0,5$  часа. Значение  $\Delta t = +3,5$  часа, обозначенное на *рис. 3* вертикальной стрелкой, соответствует временному интервалу между реальными измерениями SSMIS F16 и AMSR-2.



*Рис. 3.* Средняя ошибка интерполяции полей интегрального паросодержания атмосферы по данным SSMIS F16 как функция «синхронизации» с независимыми данными AMSR-2

Отметим, что *рис. 3* воспроизводит все основные особенности соответствующего графика на *рис. 1*. Единственным существенным отличием является возросшее значение минимума  $e_s$ , достигаемого при наилучшей «синхронизации» данных. Характер зависимости  $e_s$  от  $\Delta t$  позволяет говорить о том, что величина погрешности обусловлена не накоплением ошибки интерполяции, а, в первую очередь, неоднородностью происхождения исходных рядов данных (разные приборы, параметры наблюдения и алгоритмы обработки) и связанными с ней расхождениями в оценках  $W$ . Во всяком случае, пространственно-временная интерполяция позволяет уменьшить величину  $e_s = 2,5$  мм, полученную для исходных (не интерполированных) данных, до значения  $2,0$  мм при наилучшей «синхронизации», которое укладывается в диапазон  $0,5 - 2,0$  мм (см. Раздел 3). Следует еще раз подчеркнуть, что в работе (*WV*, 2011) указанный диапазон погрешностей получен при анализе только данных SSMIS F16 и F17.

Опустим для краткости подробное описание результатов аппроксимации распределения невязок  $\delta_i$  функциями (3) и (4), отметив, что и в данном случае наблюдается отсутствие существенной систематической ошибки, симметричность и ярко выраженный модальный характер распределения, ширина которого возрастает по мере увеличения модуля  $\Delta t$ .

В заключение этого раздела сделаем несколько замечаний по поводу сопоставления рядов данных SSMIS F16 и SSM/I F15. Как сказано выше, точность последних существенно ухудшилась после августа 2006 года, что нашло подтверждение в настоящей работе. Данные  $W^{F16}$  были подвергнуты пространственно-временной интерполяции для наилучшей «синхронизации» с данными  $W^{F15}$ . Была рассчитана линейная регрессия  $W^{F15}$  по синхронизированным  $W^{F16}$ . Для выбранного интервала наблюдений она описывается выражением

$$W^{F15} = 0,93 \cdot W^{F16} - 0,90, \quad (5)$$

наиболее заметные отклонения от которого в сторону занижения наблюдаются при больших значениях  $W$ . Тем не менее, интегральная ошибка интерполяции  $e_\delta$  оказалась минимальной при наилучшей синхронизации данных и составила 1,8 мм. Поэтому заслуживает внимания анализ возможности нелинейной корректировки данных  $W^{F15}$  на основе некоторых калибровочных кривых, вычисляемых, например, по скаттерограммам данных  $W^{F15}$  и максимально синхронизированных с ними данных  $W^{F16}$  и (или)  $W^{F17}$ .

## 5. Заключение

В работе исследована точность развитой авторами интерполяционной схемы спутникового радиотепловидения. На примере анализа представительной выборки данных установлено, что по этому показателю предложенная схема как минимум не уступает известным мировым аналогам. Так, средняя погрешность интерполяции глобальных полей интегрального паросодержания атмосферы составила 0,8 мм при сопоставлении длительных серий данных по измерениям SSMIS F16 и F17 в ноябре 2013 года. В то же время, к достоинствам схемы относятся замкнутость расчетов относительно исходных радиотепловых данных и однородность интерполяции по времени.

Кроме того, обеспечиваемая точность интерполяции позволяет по-новому подойти к задачам комплексного анализа мультисенсорных данных. В частности, заслуживает внимания анализ дополнительных возможностей взаимной калибровки и верификации продуктов обработки измерений различных спутниковых приборов путем их оптимальной «синхронизации» на основе пространственно-временной интерполяции. Возникает также принципиальная возможность применения итерационной схемы интерполяции, при которой интерполированные данные одной группы приборов (SSMIS) дополняют исходные данные других приборов (AMSR-2) в местах пропусков и сбоях, после чего возможно проведение

повторной пространственно-временной интерполяции. Такой итерационный подход может быть использован с целью дополнительной «регуляризации» расчетов, либо для их выполнения на более частой координатной сетке, для детализации пространственной структуры наблюдаемых полей. Решение указанных задач выходит за рамки настоящего исследования и может стать предметом дальнейшей работы.

### Благодарности

Использованные в работе продукты обработки измерений SSMIS произведены компанией Remote Sensing Systems (США) при поддержке NASA и находятся в свободном доступе на сайте [www.remss.com](http://www.remss.com). Продукты обработки данных AMSR-2 предоставлены службой обеспечения данными GCOM-W1 Японского агентства аэрокосмических исследований (JAXA). Разработка использованного в работе специализированного программного обеспечения частично поддержана грантом РФФИ № 15-07-04422.

### Литература

1. *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 // Исследование Земли из космоса. 2007. № 1. С. 7–13.
2. *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.
3. *Ермаков Д.М., Раев М.Д., Чернушич А.П., Шарков Е.А.* Алгоритм построения глобальных радиотепловых полей системы океан-атмосфера высокой пространственно-временной дискретизации по спутниковым микроволновым измерениям // Исследование Земли из космоса. 2013а. № 4. С. 72–82.
4. *Ермаков Д.М., Шарков Е.А., Чернушич А.П.* Анимационный анализ прецедентов быстрой интенсификации тропических циклонов / Тезисы докладов Международной конференции «Дистанционное зондирование окружающей среды: научные и прикладные исследования в Азиатско-Тихоокеанском регионе (RSAP2013)», 24–27 сентября 2013 г., Владивосток, Россия. 2013б. С. 63–64.
5. *Ермаков Д.М., Шарков Е.А., Чернушич А.П.* Возможности количественного описания мезомасштабных процессов в атмосфере на основе анимационного анализа // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014а. Т. 11. № 4. С. 153–162.
6. *Ермаков Д.М., Шарков Е.А., Чернушич А.П.* Оценка тропосферных адвективных потоков скрытого тепла над океаном при анимационном анализе радиотепловых данных спутникового мониторинга // Исследование Земли из космоса. 2014б. № 4. С. 32–38.
7. *Ермаков Д.М., Шарков Е.А., Чернушич А.П.* Роль тропосферных адвективных потоков скрытого тепла в интенсификации тропических циклонов // Исследование Земли из космоса. 2014в. № 4. С. 3–15.
8. *Ермаков Д.М., Чернушич А.П., Шарков Е.А.* Оценки и достижимые точности описания динамики и энергетики мезомасштабных и синоптических атмосферных процессов с помощью спутникового радиотеплового видения. // VIII Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь». Доклады. Москва, ИРЭ РАН, 24–28 ноября 2014. 2014г. С. 174–179.
9. *Ermakov D.M., Chernushich A.P., Sharkov E.A., Pokrovskaya I.V.* Searching for an energy source of the intensification of tropical cyclone Katrina using microwave satellite sensing data // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2013а. Vol. 49. No. 9. pp. 963–973.
10. *Ermakov D.M., Sharkov E.A., Pokrovskaya I.V., Chernushich A.P.* Revealing the energy sources of alternating intensity regimes of the evolving Alberto tropical cyclone using microwave satellite sensing data // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2013б. Vol. 49. No. 9. pp. 974–985.
11. *Palmen E., Newton C.* Atmospheric circulation systems: their structure and physical interpretation. Academic Press, 1969. pp. 26–66.
12. *Sharkov E.A.* Remote investigations of atmospheric catastrophes // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2011. Vol. 47. No. 9. pp. 1057–1071.
13. *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. pp. 1024–1036.

# Assessment of the accuracy of the interpolation scheme of satellite radiothermvision

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

<sup>1</sup> Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Fryazino Dept., Fryazino, Russia

E-mail: dima@ire.rssi.ru

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

E-mail: e.sharkov@mail.ru

The accuracy assessment of the interpolation scheme of satellite radiothermvision is performed based on the analysis of standard products: fields of atmospheric total precipitable water retrieved from global monthly measurements of SSMIS instruments onboard F16 and F17 satellites of the DMSP series and of AMSR-2 instrument onboard GCOM-W1. A representative sample of the data on the basis of a long series of measurements of all of these instruments in November 2013 was analyzed. The total sample consisted of 107 independent measurements evenly distributed over all the basins of the World Ocean. By comparison with the accuracy estimates of the alternative interpolation scheme, known in world practice, the high quality of the interpolation achieved in the approach of satellite radiothermvision was shown. When comparing homogeneous series of data based on SSMIS measurements, the average error of spatiotemporal interpolation of total precipitable water is 0.8 mm. Under cross-comparison with AMSR-2 products the error increases slightly while remaining completely satisfactory for a wide range of practical applications. A more detailed analysis by approximation of the distributions of residual errors with Gauss and Cauchy-Lorentz functions further confirms the high quality of the interpolation scheme. Some opportunities for further development and application of satellite radiothermvision are discussed.

**Keywords:** accuracy of interpolation, satellite radiothermvision

## References

1. Ermakov D.M., Raev M.D., Suslov A.I., Sharkov E.A., Elektronnaya baza mnogoletnih dannyh global'nogo radioteplovogo polya Zemli v kontekste mnogomasshtabnogo issledovaniya sistemy okean-atmosfera (Electronic long-standing database for the global radiothermal field of the Earth in context of multyscale investigation of the atmosphere-ocean system), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2007, Vol. 1, pp. 7–13.
2. Ermakov D.M., Chernushich A.P., Sharkov E.A., Shramkov Ya.N., Vozможности postroeniya kratkosrochnykh global'nykh radioteplovykh izobrazheniy sistemy okean-atmosfera na baze programmnoy platformy Stream Handler (Possibility of building short-term global radiothermal images of ocean-atmosphere system based on Stream Handler software platform), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 3, pp. 9–16.
3. Ermakov D.M., Raev M.D., Chernushich A.P., Sharkov E.A., Algoritm postroeniya global'nykh radioteplovykh poley sistemy okean-atmosfera vysokoy prostranstvenno-vremennoy diskretizatsii po sputnikovym mikrovolnovym izmereniyam (An algorithm for construction of global ocean-atmosphere radiothermal fields with high spatiotemporal sampling based on satellite microwave measurements), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 4, pp. 72–82.
4. Ermakov D.M., Sharkov E.A., Chernushich A.P., Animatsionnyy analiz pretседentov bystroy intensivatsii tropicheskikh tsiklonov (Animated analysis of precedents of rapid intensification of tropical cyclones), *Remote sensing of environment: Scientific and applied research in Asia-Pacific*, Proc. of International conference, Vladivostok, 24–27 September 2013, Vladivostok: Dal'nauka, 2013, p. 63.
5. Ermakov D.M., Sharkov E.A., Chernushich A.P., Vozможности kolichestvennogo opisaniya mezomasshtabnykh protsessov v atmosfere na osnove animatsionnogo analiza (Possibilities of quantitative description of mesoscale processes in the atmosphere based on the animated analysis), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 4, pp. 153–162.
6. Ermakov D.M., Sharkov E.A., Chernushich A.P., Otsenka troposfernnykh advektivnykh potokov skrytogo tepla nad okeanom pri animatsionnom analize radioteplovykh dannyh sputnikovogo monitoringa (Evaluation of troposphere advective latent heat fluxes over oceans by animated analysis of satellite radiothermal remote data), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 4, pp. 32–38.
7. Ermakov D.M., Sharkov E.A., Chernushich A.P., Rol troposfernnykh advektivnykh potokov skrytogo tepla v intensivatsii tropicheskikh tsiklonov (The role of tropospheric advection of latent heat in the intensification of tropical cyclones), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 4, pp. 3–15.
8. Ermakov D.M., Chernushich A.P., Sharkov E.A., Otsenki i dostizhimye tochnosti opisaniya dinamiki i energetiki mezomasshtabnykh i sinopticheskikh atmosferykh protsessov s pomoschyu sputnikovogo radioteplovideniya (Estimates and attainable accuracies of the description of dynamics and power of mesoscale and synoptic atmospheric processes with the use of satellite radiothermvision), *Proc. of the VIII All-Russian conference*

- “Radiolokatsiya i radiosvyz” (“VIII Radiolocation and radiocommunication conference”), Moscow, IRE RAS, 24-28 November 2014, pp.174–179.
9. Ermakov D.M., Chernushich A.P., Sharkov E.A., Pokrovskaya I.V., Searching for an energy source of the intensification of tropical cyclone Katrina using microwave satellite sensing data, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2013, Vol. 49, No. 9, pp. 963–973.
  10. Ermakov D.M., Sharkov E.A., Pokrovskaya I.V., Chernushich A.P., Revealing the energy sources of alternating intensity regimes of the evolving Alberto tropical cyclone using microwave satellite sensing data, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2013, Vol. 49, No. 9, pp. 974–985.
  11. Palmen E., Newton C. *Atmospheric circulation systems: their structure and physical interpretation*, Academic Press, 1969, pp. 26–66.
  12. Sharkov E.A., Remote investigations of atmospheric catastrophes, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2011, Vol. 47, No. 9, pp. 1057–1071.
  13. 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, pp. 1024–1036.