

## Климатология атмосферных рек: возможности спутникового радиотепловидения

Д.М. Ермаков

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 141120 Московская обл., г. Фрязино, пл. Введенского, 1, e-mail: [dima@ire.rssi.ru](mailto:dima@ire.rssi.ru)

*Атмосферные реки – нитевидные структуры в поле атмосферного водяного пара, обеспечивающие быстрый перенос влаги из тропиков в средние и высокие широты. Систематические исследования атмосферных рек выявили их существенную роль в меридиональном транспорте атмосферного скрытого тепла. Начинаясь во внутритропической зоне конвергенции и преодолевая границы ячеек Хэдли, атмосферные реки часто достигают полярных областей и могут существенно влиять на климатические параметры последних. Особенно выраженного влияния следует ожидать в северном полушарии, где отсутствует постоянный блокирующий эффект, связанный с циркулярным течением. Установлено, что атмосферные реки тихоокеанского бассейна являются причиной значительного числа экстремальных погодных явлений на западном побережье Северной Америки. Атмосферные реки над Атлантикой могут оказывать аналогичное воздействие на регионы Западной Европы.*

*Существенный интерес представляет климатология атмосферных рек, т.е. статистика их характеристических параметров на климатически значимых масштабах. Значительные усилия исследователей направлены на разработку и совершенствование алгоритмов обработки спутниковых данных для автоматического детектирования и восстановления параметров атмосферных рек. В настоящей работе обсуждены некоторые возможности спутникового радиотепловидения для обеспечения дальнейшего прогресса в этом направлении исследований.*

*Atmospheric rivers are filamentary structures in the field of atmospheric water vapor, which realize a rapid transfer of moisture from the tropics to the middle and high latitudes. Systematic studies of atmospheric rivers have revealed their significant role in the meridional transport of atmospheric latent heat. Starting in the intertropical convergence zone and overcoming the boundaries of Hadley cells, atmospheric rivers often reach Polar Regions and can significantly affect the climatic parameters of the latter. Particularly pronounced influence should be expected in the northern hemisphere, where there is no permanent blocking effect by the circumpolar current. It is established that the atmospheric rivers of the Pacific basin cause a significant number of extreme weather events on the west coast of North America. Atmospheric rivers over the Atlantic can have a similar effect on the regions of Western Europe.*

*Of considerable interest is the climatology of atmospheric rivers, i.e. statistics of their characteristic parameters on climatically significant scales. Significant efforts of researchers are aimed at developing and improving algorithms of satellite data processing for automatic detection and recovery of parameters of atmospheric rivers. In this paper some of the possibilities of satellite radiothermovision are discussed which can ensure further progress in the research area.*

### Введение

Термин «атмосферные реки» восходит к работе [1], в которой авторы, отмечая «нитевидную структуру» в полях суточных потоков тропосферного водяного пара, проводят сравнение с «реками». Исследованные авторами «реки» («тропосферные реки») являлись протяженными объектами с характерным временем жизни в несколько суток, образующими поток влаги, сопоставимый с потоком Амазонки. Собственно «атмосферными реками» этот феномен впервые назван, вероятно, в последующей работе [2]. Авторы исследовали аспекты взаимодействия атмосферных рек (АР) с внутритропическими циклонами и показали, что существенную роль в усилении последних

играет высвобождение скрытого тепла, адвекцию которого из тропических областей обеспечивают АР. Заслуживает внимания методика исследования: на основе результатов численного моделирования авторы строили векторные карты потоков скрытого тепла, наложенные на цветовые карты атмосферного давления для полудня и полуночи по единому времени; собирали из полученных карт хронологические последовательности для отдельных бассейнов Мирового океана и анализировали их как видеоряды. Этот, полностью основанный на моделировании, подход образует интересную параллель с подходом спутникового радиотепловидения, независимо разработанным для «анимационного» анализа данных спутниковых наблюдений и впервые примененным в исследовании роли адвекции скрытого тепла в эволюции тропических циклонов [3,4]. В дальнейшем численное моделирование выявило существенную роль АР в общем меридиональном переносе скрытого тепла в средних широтах [5].

Хотя сам термин «атмосферные реки» до сих пор вызывает определенные возражения, и метеорологами предложен ряд альтернативных названий [6,7], обозначаемое им явление привлекало в последние десятилетия все более широкое внимание и стало объектом всесторонних исследований, основанных как на моделировании, так и на анализе дистанционных данных, а также на сочетании этих подходов. В частности, было показано, что существенная часть экстремальных погодных явлений (штормовых ветров, ливневых дождей, снегопадов, наводнений, селей) в прибрежных материковых зонах средних широт связана с действием АР [8-11]. Чрезвычайно актуальной стала задача систематического исследования АР на климатически значимых масштабах и связанная с ней проблема автоматического детектирования АР и диагностики их параметров на фоне других атмосферных процессов. Подходы к решению последней проблемы развиваются в двух основных направлениях [12]: анализ пространственной структуры поля интегрального влагосодержания атмосферы по данным дистанционного зондирования [13,14], моделирования или реанализа [15] и анализ вертикально интегрированных адвективных потоков водяного пара по численным моделям [5]. При этом, как отмечено выше, все более распространенным становится комплексный подход, сочетающий использование дистанционных данных и модельных оценок [16].

В [16] выделены следующие основные проблемы, возникающие при использовании данных спутникового радиотеплового мониторинга в исследовании климатологии АР:

- 1) пропуски данных в ряде случаев существенно затрудняют автоматическое детектирование АР;
- 2) численные критерии детектирования АР, разработанные на ограниченном объеме наблюдений над отдельными бассейнами Мирового океана, требуют проверки и уточнения для универсального применения в глобальном масштабе;
- 3) для повышения качества детектирования АР желательно иметь синхронные оценки полей интегрального влагосодержания и адвекции скрытого тепла.

Целью настоящей работы является показать, как указанные трудности могут быть преодолены в рамках анализа дистанционных данных (без привлечения схем численного моделирования) с использованием спутникового радиотепловидения. В следующих двух разделах даны краткое описание подхода спутникового радиотепловидения и анализ перечисленных выше проблем в свете указанного подхода. Дополнительно обсуждена еще одна проблема, касающаяся лучшей взаимной синхронизации спутниковых данных. В Заключении резюмированы результаты анализа и обсуждены перспективы дальнейшей работы.

### **Спутниковое радиотепловидение**

Подход спутникового радиотепловидения основан на разновидности схемы пространственно-временной интерполяции, относящейся к блочным методам так называемого анализа оптического потока [17]. Аналогичные подходы применяются для восстановления векторов атмосферных движений по перемещениям облаков или характерных структур водяного пара на различных высотах [18]. Однако, подход спутникового радиотепловидения развит для применения к глобальным полям интегрального влагосодержания атмосферы, восстанавливаемым по данным радиотеплового зондирования с полярно-орбитальных спутников и обеспечивает расчет плотного поля адвекции [3,4]. Принципиальная возможность описания эволюции поля интегрального влагосодержания единым векторным полем адвекции с удовлетворительной точностью была продемонстрирована в [19], где в качестве такого поля использована сумма взвешенных полей модельных ветров на нескольких уровнях. Преимущество спутникового радиотепловидения в том, что оно не использует модельных оценок, и вычисление поля адвекции осуществляется непосредственно из данных спутниковых наблюдений, обеспечивая даже некоторое улучшение средней точности интерполяции [20,4] по сравнению с [19].

Важным аспектом подхода спутникового радиотепловидения является одновременное восстановление интерполированных полей интегрального влагосодержания атмосферы в промежуточные между измерениями моменты времени и соответствующих им векторных полей адвекции, что позволяет вычислять потоки скрытого тепла через произвольно задаваемые границы. Эта возможность была впервые использована при анализе эволюции тропических циклонов, а затем в исследовании меридионального переноса скрытого тепла в системе глобальной циркуляции атмосферы. В настоящей работе рассмотрены возможности спутникового радиотепловидения в контексте исследования климатологии атмосферных рек.

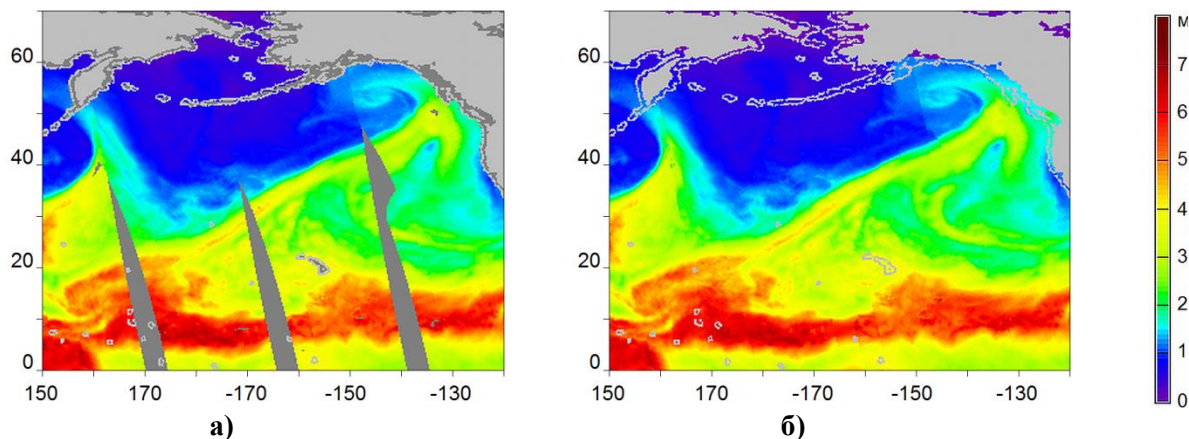
### **Проблемные аспекты дистанционных исследований атмосферных рек в свете спутникового радиотепловидения**

Как отмечено во Введении, подход спутникового радиотепловидения позволяет преодолеть ряд проблем, связанных с автоматическим детектированием АР и диагностикой их параметров. В настоящем разделе приведены конкретные примеры обработки спутниковых данных, иллюстрирующие возможности этого подхода.

#### **Пропуски данных**

Восстановленные поля интегрального влагосодержания атмосферы содержат пропуски. Часть пропусков обусловлена техническими особенностями съемки или сбоями в работе приборов. Кроме того, имеются систематические пропуски (лакуны), связанные с расхождением полос съемки в низких и средних широтах, рис. 1а.

Автоматическое детектирование АР предполагает поиск узких протяженных атмосферных особенностей, более 2000 км в длину и менее 1000 км [16] или 500 км [12] в ширину, характеризующихся высоким интегральным влагосодержанием. Разрывы в анализируемых полях приводят к фрагментации объектов поиска, существенно затрудняют обнаружение его частей и оценку его полных линейных размеров. Спутниковое радиотепловидение, за счет алгоритма сшивки лагун и пространственно-временной интерполяции, обеспечивает восстановление полей интегрального влагосодержания атмосферы без пропусков и кардинально облегчает автоматическое детектирование протяженных атмосферных особенностей, рис. 1б.



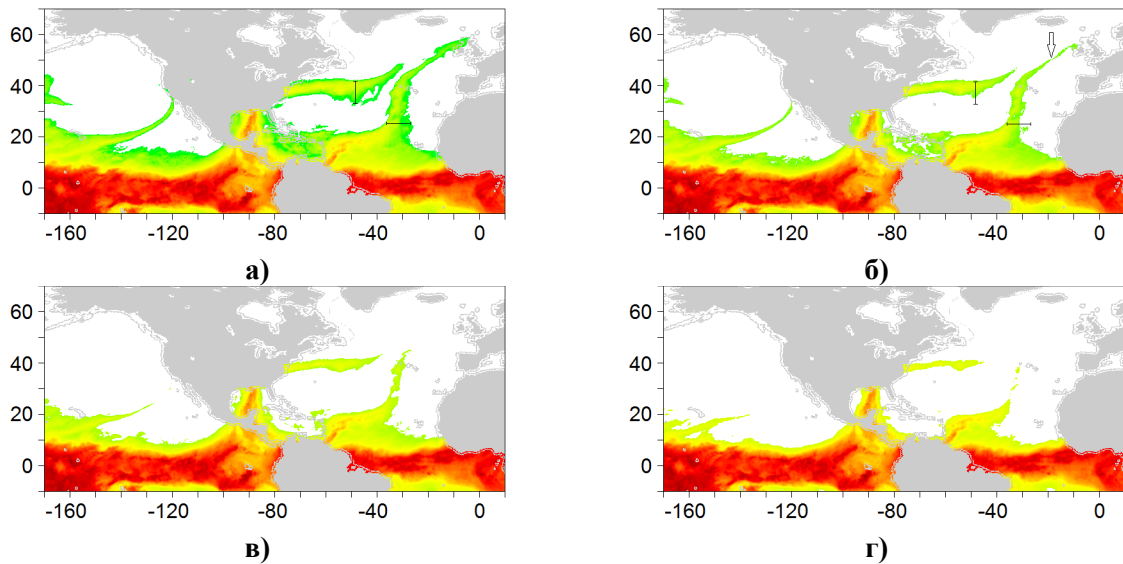
**Рис. 1. Фрагмент поля интегрального влагосодержания атмосферы над Тихим океаном (цветовая шкала значений в мм – справа) за 01.12.2016: а) мозаика по данным SSMIS F16 и SSMIS F17, по аналогии с [16]; б) продукт спутникового радиотепловидения. На полях географические координаты фрагмента в градусах; положительные значения – для северного и восточного полушарий, отрицательные – для южного и западного**

На рис. 1 отчетливо видна АР, начинающаяся во внутритропической зоне конвергенции около  $20^{\circ}$  с.ш.,  $170^{\circ}$  в.д. и протянувшаяся в северо-восточном направлении до западного побережья Северной Америки. При стандартном мозаичном объединении данных АР распадается на 3 фрагмента, разделенных лакунами (показанными на рис. 1а темно-серым цветом). Поскольку предложенные алгоритмы детектирования АР [16] не предполагают дополнительной интерполяции данных (кроме простейшей медианной фильтрации), формирование полного образа АР на основе имеющихся данных SSMIS оказывается невозможным. Спутниковое радиотепловидение позволяет восстановить целостную картину явления, рис. 1б.

### **Настройка критериев детектирования**

Как отмечено в [16], критерии детектирования АР, относящиеся к определенному бассейну Мирового океана, могут потребовать доработки для адаптации к другим областям наблюдений. Выработка универсальных критериев автоматического детектирования требует обработки и анализа большого объема данных в глобальных масштабах наблюдений. Успешное решение этой задачи связано с преодолением ряда технических трудностей: обеспечением быстрого получения (или построения) полей интегрального влагосодержания глобального покрытия; осуществлением интерактивного управления процедурами обработки с целью оптимальной настройки критерия детектирования; эффективной динамической визуализацией данных и результатов обработки.

Все указанные аспекты задачи находят решения в подходе спутникового радиотепловидения, которые реализованы и внедрены при развитии геопортала спутникового радиотепловидения [21] и выполнения проекта «ИКАР» [22]. Геопортал содержит к настоящему времени массив глобальных полей интегрального влагосодержания атмосферы на регулярной сетке  $0,25^{\circ}$  в непрерывном диапазоне наблюдений с 2003 по 2016 годы, интерполированных с шагом 3 часа. Функционал проекта «ИКАР» обеспечивает возможность описания различных алгоритмов обработки этих данных, удаленного исполнения этих алгоритмов на сервере геопортала и визуализации результатов обработки. Рис. 2 иллюстрирует применение простейшего порогового критерия выделения областей высокого интегрального влагосодержания.



**Рис. 2. Поле интегрального влагосодержания над северо-востоком Тихого океана и Северной Атлантикой за 11.03.2016 по алгоритму спутникового радиотепловидения (цветовая шкала и обозначения координат – как на рис. 1). Показаны значения влагосодержания выше порогов: а) 20 мм; б) 23 мм; в) 26 мм; г) 30 мм. Масштабные отрезки на верхних рисунках соответствуют 1000 км**

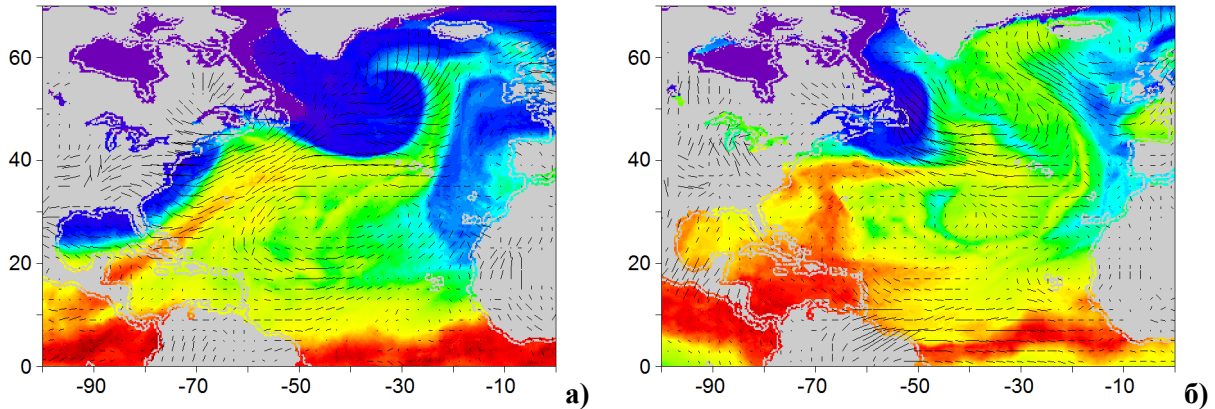
Показаны области интегрального влагосодержания атмосферы, превышающего введенные по аналогии с [16] пороги в 20, 23, 26 и 30 мм. На рис. 2а отчетливо видны три АР. Первая пересекает северо-восточную акваторию Тихого океана, достигая побережья Северной Америки около 35° с.ш. Вторая начинается на востоке Тихого океана, пересекает Мексику и Мексиканский залив западнее Юкатана, проходит над восточным побережьем Северной Америки выше Флориды и тянется к центру Северной Атлантики вдоль 40° с.ш. Третья пересекает Атлантику в преимущественно меридиональном направлении и достигает севера Шотландии около 55° с.ш. Следует отметить, что две атлантические АР могут быть пропущены при автоматическом детектировании вследствие их ширины: масштабные отрезки в 1000 км на рис. 2а целиком укладываются внутрь образов АР в их наиболее широких местах.

Увеличение порога до 23 мм (рис. 2б) почти не сказывается на образе тихоокеанской АР, в то время как ширина остальных двух существенно уменьшается. При этом, однако, возникают разрывы в образе восточной АР, в частности, показанный стрелкой на рис. 2б около 50° с.ш., 20° з.д., что может приводить к заметным ошибкам в определении длины АР. Дальнейшее увеличение порога до 26 мм (рис. 2в) вызывает разрушение северной части образа тихоокеанской АР, который теперь заканчивается около 20° с.ш. Образы атлантических АР достигают примерно 40° с.ш. Наконец, при пороге 30 мм происходит разрушение образа самой восточной АР, также около 20° с.ш. Изменения в длине центральной АР все еще сравнительно невелики.

Обращает на себя внимание неустойчивость линейных размеров образов АР по отношению к малым изменениям порога детектирования. Более перспективными представляются многопороговые и/или адаптивные алгоритмы детектирования АР. Здесь подход спутникового радиотепловидения может быть полезен для эффективной организации распределенной обработки и анализа дистанционных данных. Функционал проекта «ИКАР» позволяет унифицировано описывать и тестировать различные алгоритмы обработки. Геопортал спутникового радиотепловидения обеспечивает простой быстрый доступ к массиву глобальных полей интегрального влагосодержания атмосферы (и других геофизических параметров) по данным многолетних наблюдений.

### Учет поля адвекции

Объединение поля интегрального влагосодержания с векторными полями адвекции водяного пара способно существенно улучшить результаты детектирования, однако до сих пор такая возможность рассматривалась только в связи с применением схем синоптического численного моделирования [16]. Спутниковое радиотепловидение предлагает альтернативный подход, обеспечивая расчет поля адвекции непосредственно из серии спутниковых наблюдений, рис. 3.



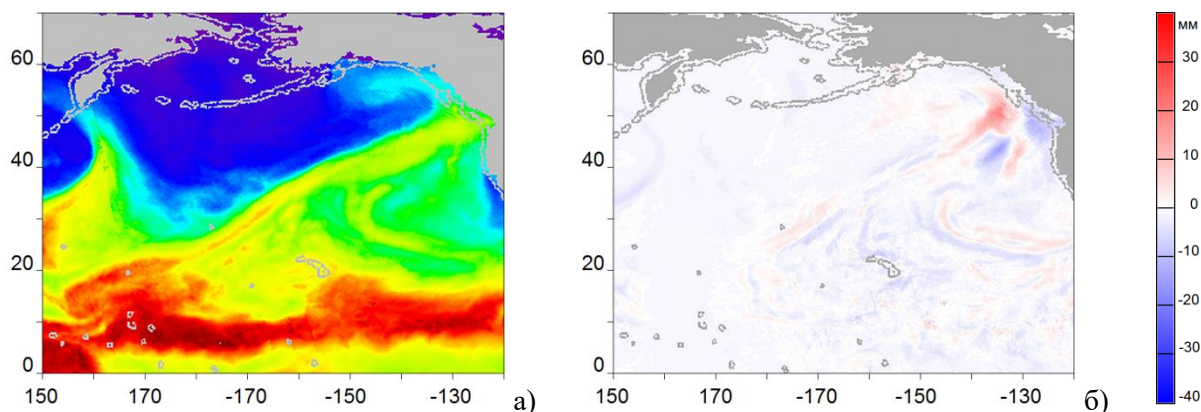
**Рис. 3. Поле интегрального влагосодержания над Северной Атлантикой с наложенными элементами поля адвекции; расчет на даты наблюдений: а) 21.03.2016; б) 01.06.2016. Цветовая шкала и обозначения координат – как на рис. 1**

Рис. 3. иллюстрирует направления и относительные скорости адвекции, наблюдаемой в полях интегрального влагосодержания атмосферы. Для упрощения картины поле адвекции прорежено с шагом  $2^\circ$ , векторы представлены ненаправленными отрезками в той же проекции, что и поля влагосодержания. Геометрическая коррекция и нормировка элементов поля адвекции для перехода к абсолютным значениям скорости и расчету потоков скрытого тепла подробно разобраны в [23]. Здесь же важно отметить, что направление адвекции внутри образа АР, вообще говоря, не параллельно ее оси вследствие сдвигов и эволюции АР при взаимодействии с другими атмосферными системами, например, внетропическими циклонами. Это обстоятельство нужно учитывать в алгоритмах детектирования и восстановления параметров АР. Поскольку в среднем градиенты поля интегрального влагосодержания вдоль оси АР гораздо меньше, чем поперек оси, для расширения набора потенциальных трассеров при анализе движения внутри АР целесообразно проводить расчеты на более детальной сетке [24,4] и/или привлекать дополнительные данные (например, поля полного водозапаса облаков, интенсивности осадков).

### Синхронизация спутниковых данных

Традиционный мозаичный подход построения полей геофизических параметров имеет в контексте рассматриваемой задачи климатологии АР еще один недостаток. АР являются протяженными объектами, способными охватывать сразу несколько временных поясов. Данные измерений с солнечно-синхронных спутников относятся к одному и тому же местному времени и, соответственно, интервалы между измерениями различных фрагментов АР могут составлять несколько часов. При быстрой эволюции АР такая асинхронность может оказаться существенной для дистанционной диагностики их параметров. Нужно также отметить, что в зональном отношении распространение АР происходит в восточном направлении, а спутниковый мониторинг с солнечно-синхронных орбит осуществляется в противоположном, на запад.

Спутниковое радиотепловидение обеспечивает приведение интерполированных полей интегрального влагосодержания к единому моменту всемирного времени [24] для реконструкции «мгновенной» картины атмосферных процессов, рис. 4.



**Рис. 4. Интегральное поле влагосодержания атмосферы (цветовая шкала – см. рис. 1), приведенное к единому всемирному времени 02.12.2016 01:00 (а), и разность полей, показанных на рис. 1б и рис. 4а (б), цветовая шкала – справа**

На рис. 4а построено «мгновенное» поле интегрального влагосодержания атмосферы в момент времени, близко соответствующий пролету SSMIS F16 и SSMIS F17 над  $170^\circ$  в.д., т.е. в районе «истока» АР, показанной на рис. 1. Следует отметить, что образ АР на рис. 1 построен во «временной развертке», при фиксированном местном времени обзора. Это означает, что конец АР, выходящий на побережье Северной Америки около  $130^\circ$  з.д. (т.е. в  $60^\circ$  к востоку от начала АР), наблюдался четырьмя часами ранее, чем ее начало. За эти четыре часа произошло изменение оси АР и существенное смещение места ее выхода на континент в юго-восточном направлении. Это хорошо видно на рис. 4б, который иллюстрирует разность полей, показанных на рис. 1б и рис. 4а, соответственно. Как и следовало ожидать, минимальные отличия наблюдаются в зоне  $165\text{--}175^\circ$  в.д. Наиболее заметные отличия связаны с быстрой эволюцией АР. Положительная разность (красные тона) соответствует образу АР на рис. 1б (в формате временной развертки), а отрицательная (синие тона) – образу АР на рис. 4а (в формате единого времени).

Таким образом, алгоритмы спутникового радиотепловидения могут оказаться полезными для уточнения ряда характеристик АР, особенностью которых является сочетание значительной зональной протяженности и быстрой эволюции.

### **Заключение**

В работе рассмотрены проблемные аспекты задачи климатологии атмосферных рек и показаны пути их преодоления с помощью алгоритмов спутникового радиотепловидения. В частности, продемонстрировано, что применение подхода спутникового радиотепловидения кардинально упрощает задачу анализа фрагментированных спутниковых данных; обеспечивает унифицированный подход к разработке, тестированию и отладке алгоритмов детектирования АР на большом объеме дистанционной информации; обеспечивает расчет адвекции, наблюдаемой в восстановленных полях интегрального влагосодержания; позволяет привести наблюдаемые поля к единому моменту всемирного времени.

Перспективным направлением развития работы представляется построение критерия детектирования атмосферных рек на базе функционала «ИКАР» и геопортала спутникового радиотепловидения. Такой критерий может быть предложен другим

исследовательским коллективам для удаленного тестирования, доработки и использования, а также непосредственно применен на следующих этапах работы при наборе статистики и формировании климатологического описания атмосферных рек.

*Создание использованного в работе программного обеспечения частично поддержано грантом РФФИ № 15-07-04422. Интерполированные поля интегрального влагосодержания доступны для просмотра и загрузки на сервере геопортала спутникового радиотепловидения по адресу <http://fire.fryazino.net/trpw/>.*

### Литература

1. *Newell R.E., Newell N.E., Zhu Y., Scott C.* Tropospheric rivers? – A pilot study // *Geophysical Research Letters*, 1992, V. 19, No. 24, P. 2401–2404.
2. *Zhu Y., Newell R.E.* Atmospheric rivers and bombs // *Geophysical Research Letters*, 1994, V. 21, No. 18, P. 1999–2002.
3. *Ермаков Д.М., Шарков Е.А., Чернушич А.П.* Роль тропосферных адвективных потоков скрытого тепла в интенсификации тропических циклонов // *Исследование Земли из космоса*, 2014, № 4, С. 3–15.
4. *Ermakov D.M., Sharkov E.A., Chernushich A.P.* Satellite radiothermvision of atmospheric mesoscale processes: case study of tropical cyclones // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2015, V. 40, No. 7/W3, P. 179–186.
5. *Zhu Y., Newell R.E.* A proposed algorithm for moisture fluxes from atmospheric rivers // *Monthly weather review*, 1998, V. 126, No. 3, P. 725–735.
6. *Bao J.W., Michelson S.A., Neiman P.J., Ralph F.M., Wilczak J.M.* Interpretation of enhanced integrated water vapor bands associated with extratropical cyclones: their formation and connection to tropical moisture // *Monthly Weather Review*, 2006, V. 134, No. 4, P. 1063–1080.
7. *Knippertz P., Wernli H.* A Lagrangian climatology of tropical moisture exports to the Northern Hemispheric extratropics // *Journal of Climate*, 2010, V. 23, No. 4, P. 987–1003.
8. *Ralph F.M., Neiman P.J., Wick G.A., Gutman S.I., Dettinger M.D., Cayan D.R., White A.B.* Flooding on California’s Russian river: Role of atmospheric rivers // *Geophysical Research Letters*, 2006, V. 33, No. 13, L13801, doi: 10.1029/2006GL026689.
9. *Leung L.R., Qian Y.* Atmospheric rivers induced heavy precipitation and flooding in the western U.S. simulated by the WRF regional climate model // *Geophysical Research Letters*, 2009, V. 36, No. 3, L03820, doi: 10.1029/2008GL036445.
10. *Guan B., Molotch N.P., Waliser D.E., Fetzer E.J., Neiman P.J.* Extreme snowfall events linked to atmospheric rivers and surface air temperature via satellite measurements // *Geophysical Research Letters*, 2010, V. 37, No. 20, L20401, doi: 10.1029/2010GL044696.
11. *Ralph F.M., Dettinger M.D.* Storms, floods, and the science of atmospheric rivers // *Eos*, 2011, V. 92, No. 32, P. 265–272.
12. *Gimeno L., Nieto R., Vazquez M., Lavers D.A.* Atmospheric rivers: a mini-review // *Frontiers in Earth Science*, 2014, V. 2, doi: 10.3389/feart.2014.00002.
13. *Ralph F.M., Neiman P.J., Wick G.A.* Satellite and CALJET aircraft observations of atmospheric rivers over the eastern North Pacific ocean during the winter of 1997/98 // *Monthly Weather Review*, 2004, V. 132, No. 7, P. 1721–1745.
14. *Matrosov S.Y.* Characteristics of landfalling atmospheric rivers inferred from satellite observations over the Eastern North Pacific ocean // *Monthly Weather Review*, 2013, V. 141, No. 11, P. 3757–3768.
15. *Dettinger M.D., Ralph F.M., Das T., Neiman P.G., Cayan D.R.* Atmospheric rivers, floods and water resources of California // *Water*, 2011, V. 3, No. 2, P. 445–478.



16. Wick G.A., Neiman P.J., Ralph F.M. Description and validation of an automated objective technique for identification and characterization of the integrated water vapor signature of atmospheric rivers // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, V. 51, No. 4, P. 2166–2176.
17. Barron J.L., Fleet D.J., Beauchemin S.S. Performance of optical flow techniques // International Journal of Computer Vision, 1994, V. 12, No. 1, P. 43–77.
18. Velden C.S., Hayden C.M., Nieman S.J., Menzel W.P., Wanzong S., Goerss J.S. Upper-tropospheric winds derived from geostationary satellite water vapor observations // Bulletin of the American Meteorological Society, 1997, V. 78, No. 2, P. 173–195.
19. Wimmers A.J., Velden C.S. Seamless advective blending of total precipitable water retrievals from polar-orbiting satellites // Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2011, V. 50, No. 5, P. 1024–1036.
20. Ермаков Д.М., Шарков Е.А., Чернушич А.П. Оценка точности интерполяционной схемы спутникового радиотепловидения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2015, Т. 12, № 2, С. 77–88.
21. Ермаков Д.М., Чернушич А.П., Шарков Е.А. Геопортал спутникового радиотепловидения: данные, сервисы, перспективы развития // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2016, Т. 13, № 3, С. 46–57.
22. Ермаков Д.М., Чернушич А.П. Развитие сетевых сервисов геопортала спутникового радиотепловидения // Электронные библиотеки, 2017, Т. 20, № 1, С. 50–76.
23. 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, 2014, № 4, С. 32–38.
24. Ermakov D.M., Sharkov E.A., Chernushich A.P. A multisensory algorithm of satellite radiothermovision // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 2016, V. 52. No. 9, P. 1172–1180.