

Гидрометеорология и экология. 2024. № 74. С. 44—56.

Hydrometeorology and Ecology. 2024;(74):44—56.

Научная статья

УДК 551.571:528.8.042.8

doi: 10.33933/2713-3001-2024-74-44-56

Детектирование и выделение атмосферных рек по данным наблюдений спутникового радиотепловидения

**Александр Борисович Селунский¹, Владислав Викторович Вакуленко¹,
Дмитрий Михайлович Ермаков^{1, 2}, Алексей Владимирович Кузьмин¹,
Евгений Владимирович Пашинов¹**

¹ Институт космических исследований РАН, Москва, Россия, alexendersel@mail.ru

² Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова
РАН, Фрязино, Московская обл., Россия, pldime@gmail.com

Аннотация. В работе представлен начальный этап построения нового алгоритма детектирования и локализации атмосферных рек (АР) на основе анализа полей интегрального влагосодержания атмосферы (ИВА) по данным микроволновых сканеров SSMIS. Критерием детектирования потенциальных АР являлось превышение ИВА адаптивного порогового значения. С помощью этого критерия были построены бинарные маски областей высоких значений ИВА и проведена их скелетизация. Проанализировано положение скелетов потенциальных АР ежемесячно за первую половину 2012 г. Продемонстрирована сильная изменчивость пространственного положения потенциальных АР, определенных по представленному алгоритму. Вместе с тем четко выделены наиболее известные и стабильно формирующиеся АР. Расчет переноса влаги в АР возможен с помощью подхода спутникового радиотепловидения.

Ключевые слова: глобальные поля интегрального влагосодержания атмосферы, атмосферные реки, поля адвекции, микроволновая радиометрия, спутниковое радиотепловидение.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственных заданий ИКИ РАН (тема «Мониторинг», гос. рег. № 122042500031-8) в части адаптации и применения алгоритмов спутникового радиотепловидения, а также ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН (тема «Космос-2» гос. рег. № 0030-2019-0008) в части построения общей схемы нового алгоритма детектирования и локализации атмосферных рек.

Для цитирования: Селунский А. Б., Вакуленко В. В., Ермаков Д. М., Кузьмин А. В., Пашинов Е. В. Детектирование и выделение атмосферных рек по данным наблюдений спутникового радиотепловидения // Гидрометеорология и экология. 2024. № 74. С. 44—56. doi: 10.33933/2713-3001-2024-74-44-56.

Original article

Detection and selection of atmospheric rivers according to observations of satellite radiothermovision

*Alexander B. Selunsky¹, Vladislav V. Vakulenko¹,
Dmitry M. Ermakov^{1, 2}, Alexey V. Kuzmin¹, Evgeny V. Pashinov¹*

¹ Space Research Institute RAS, Moscow, Russia, alexendersel@mail.ru

² Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS, Fryazino Branch, Fryazino, Moscow region, Russia, pldime@gmail.com

Summary. The paper presents the initial stage of constructing a new algorithm for detecting and localizing atmospheric rivers (AR), which is based on the analysis of fields of the precipitable water vapor (PWV) obtained from data from SSMIS microwave scanners using the satellite radiothermovision method. An adaptable threshold for the PWV value was applied to such fields, the excess of which served as a criterion for detecting potential ARs. Using a given threshold value, binary masks of areas of high moisture content were then constructed and their skeletonization was carried out. The position of the skeletons of potential ARs was analyzed monthly for the first half of 2012. The paper demonstrated the strong variability in the spatial position of potential ARs determined by the presented algorithm. At the same time, the position and direction of the most well-known and stably forming ARs are clearly visible in the images. The method of satellite radiothermovision allows, along with the construction of global fields of the precipitable water vapor of the atmosphere, to estimate the rate of horizontal transfer of water vapor using a special method for estimating optical flow. This makes it possible to measure moisture flow through a selected cross section of potential ARs along with an analysis of their geometric parameters, morphology and time evolution, which is a further stage of research.

Keywords: global precipitable water vapor fields, atmospheric rivers, advection fields, microwave radiometry, satellite radiothermovision.

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the state assignments of the IKI RAS ("Monitoring", state. reg. No. 122042500031-8) in part of adaptation and application of satellite radiothermovision algorithms, as well as IRE RAS ("Kosmos-2" state. reg. No. 0030-2019-0008) in part of constructing a general scheme of a new algorithm for detecting and localizing atmospheric rivers.

For citation: Selunsky A. B., Vakulenko V. V., Ermakov D. M., Kuzmin A. V., Pashinov E. V. Detection and selection of atmospheric rivers according to observations of satellite radiothermovision. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(74):44—56. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2024-74-44-56.

Введение

Систематическое исследование атмосферных рек (АР) началось всего несколько десятилетий назад [1—2] и вызывает оживлённую дискуссию. АР играют существенную роль в глобальном круговороте воды на Земле: согласно некоторым оценкам, на них приходится более 90 % глобального меридионального переноса водяного пара, при этом АР покрывают менее 10 % любой заданной внетропической линии широты [3]. За последние десятилетия количество исследований, посвящённых АР, растёт по всему миру.

АР выступают одной из основных причин экстремальных осадков [4—5], которые вызывают сильные наводнения во многих среднеширотных, прибрежных регионах мира, включая западное побережье Северной Америки, Западную

Европу, западное побережье Северной Африки и т.д. С другой стороны, отсутствие АР там, где они обычно бывают, зачастую приводит к возникновению засух в различных частях мира, например, Южной Африке, Испании и Португалии.

Подходы к решению проблемы систематического исследования АР развиваются в нескольких основных направлениях. Первое направление основано на использовании величины интегрального влагосодержания атмосферы (ИВА). По спутниковым данным строятся поля ИВА, к которым применяется заранее определенный пороговый критерий. Области с ИВА > 20 мм, более 2000 км в длину и менее 1000 км в ширину, согласно методике [6], определяются как атмосферные реки. В качестве исходных для критериальной оценки АР можно использовать данные реанализа и/или модельные оценки [7].

Второе направление связано с вычислением потока IVT (англ. Integral vapor transport) с помощью реанализа или модели атмосферного давления на горизонтах от 1000 до 300 гПа. Далее используется пороговое значение IVT для определения местоположения и границ атмосферных рек. Так, порог IVT 250 кг/(м·с) определяет АР как непрерывный объект длиной более 2000 км [8]. Величина этого порога может варьироваться для разных типов регионов: например, для АР Сибири в работе [9] было установлено пороговое значение в 200 кг/(м·с). В исследовании [5] рассматриваются процессы осадкообразования в АР на северо-восточной части Тихого океана (20—50°с.ш., 160—110° з.д.) в течение четырёх зимних сезонов (октябрь—апрель) с момента запуска спутника GPM в 2014—2018 гг. АР определяется на основе критериев, установленных в работе [10], которые были рассчитаны на основе данных Национального центра экологического прогнозирования (англ. National Centers for Environmental Prediction — NCEP) с помощью Системы прогноза климата и операционного анализа (англ. Climate Forecast System Reanalysis — CFSR) [11, 12]. Данные NCEP-CFSR доступны на горизонтальной сетке с шагом 0,5×0,5 каждые 6 ч при 00:00, 06:00, 12:00 и 18:00 UTC для периода реанализа (1979—2011 гг.) и для текущего операционного периода (с 2011 г. до настоящего времени).

Более гибкий третий подход был реализован в работе [13]. Пороговое значение здесь рассчитывается для каждой точки, определенной авторами координатной сетки. Вычисляется среднесуточное значение IVT (взятое из четырех 6-часовых временных шагов) по данным за 1979—2014 гг. Из значений IVT берется максимальное, превышающее этот порог, за каждый день, а затем выполняется 15-дневное сглаживание. Это создает временную серию ежедневного максимального IVT за указанный период. Порог на каждый день года рассчитывается как 85 % сглаженных максимальных значений. Использование дневных порогов учитывает сезонные вариации, которые присутствуют в величине IVT в течение года.

Четвертый подход связан с выявлением гидрологических экстремумов, например, экстремальных осадков, наводнений [5—7, 14] или оползней [4]. После выделения экстремумов производится оценка состояния атмосферы с использованием, например, параметров ИВА или IVT, или удельной влажности в сочетании с данными о скорости и направлении ветра, чтобы установить возможное наличие атмосферной реки в исследуемой области [7]. Так, в работе [14] проводится анализ

возможных будущих стихийных катаклизмов в регионе Сан-Франциско в условиях глобального климатического потепления, в частности, исследуется одновременное возникновение атмосферных рек и внутритропических циклонов. Построена многофакторная модель средних слоёв тропосферы. Авторами утверждается, что при наличии циклонов количество осадков, переносимое АР, будет увеличиваться до 1,5 раз быстрее при повышении глобальной температуры на 1 °С по сравнению с моделью Клаузиуса–Клайперона. При этом авторы отмечают, что рост осадков в АР без циклонов будет значительно слабее. В исследовании [15] разработан алгоритм, который применяют к данным реанализа за 1997—2014 гг., чтобы исследовать влияние АР на экстремальные ветры и осадки. Авторами утверждается, что с выходом АР на сушу связано примерно от 40 до 70 % шквалов и ливней вдоль береговых линий с резким усилением скорости ветра примерно в два раза.

С самых ранних работ, посвященных атмосферным рекам [1, 2] проводится связь между ними и общей «нитевидной структурой» (“filamentary structure”) атмосферной циркуляции водяного пара. Однако нам неизвестны работы, посвященные систематическому анализу этой связи. В частности, открытым остается вопрос, является ли любой элемент «нитевидной структуры» с «подходящими» морфологическими параметрами и размерами атмосферной рекой, т. е. соответствует ли он известным феноменологическим определениям АР по критериям экстремальных значений влагосодержания и потока влаги.

Цель наших долговременных исследований — по возможности исчерпывающий анализ «нитевидной» структуры атмосферной циркуляции скрытого тепла (водяного пара), который позволил бы максимально надёжно детектировать атмосферные реки в полях геофизических параметров, прежде всего интегрального влагосодержания, нижней тропосферы и вычислять связанные с ними характеристики энерго- и массообмена. Такой подход позволил бы ответить на один из центральных проблемных вопросов: все ли «нитевидные» образования в поле интегрального влагосодержания, характеризующиеся определёнными соотношениями размеров и географическим расположением, являются «реками», т. е. обеспечивают потоки скрытого тепла, существенно превосходящие «фоновые» значения потоков вне этих рек. Предлагаемая статья описывает первые результаты в указанном направлении. Для краткости и простоты изложения далее говорится не об элементах нитевидной структуры, которые могут рассматриваться в качестве потенциальных АР, а об АР, но с учетом этой оговорки. Кроме того, продемонстрированы возможности дальнейшего изучения характеристик выделенных АР (скорости переноса водяного пара, морфологии и временной эволюции), необходимого для проверки соответствия известным феноменологическим определениям АР. Переход к систематическому изучению этих характеристик будет осуществлен на дальнейших этапах исследования. Он возможен только после массовой обработки всех имеющихся спутниковых данных по алгоритмам, построенным и описанным на текущем этапе.

Развиваемый в отделе исследований Земли из космоса Института космических исследований РАН метод спутникового радиотепловидения позволяет использовать данные микроволновых спутников SSMIS (англ. Special Sensor Microwave Imager Sounder) для построения полей интегрального влагосодержания

с глобальным покрытием как над океаном, так и над сушей, а также векторных полей адвекции водяного пара, описывающих атмосферную динамику. На основе этих данных проводится выделение АР по суточным изображениям водяного пара по всей планете. Алгоритм программного выделения АР на картах спутниковых данных основан на применении адаптируемого порогового значения интегрального влагосодержания, превышение которого служит критерием детектирования АР.

Алгоритм выделения атмосферных рек

В нашей работе алгоритм выделения АР построен на анализе изображений интегрального влагосодержания атмосферы, полученных по данным микроволновых сканеров SSMIS [16] с использованием метода спутникового радиотепловидения. Одной из проблем непосредственного использования данных SSMIS для анализа интегрального водяного пара является наличие лакун в спутниковых данных. Схема сканирования SSMIS не позволяет получать полного покрытия данными всего Земного шара, из-за чего между областями измерений остаются существенные лакуны. Суть методики спутникового радиотепловидения состоит в возможности восстановления интегральных по высоте атмосферы адвективных потоков водяного пара по данным спутникового радиотеплового мониторинга [17] и заключается в вычислении такого поля скорости адвекции, которое оптимальным образом описывает последовательную трансформацию полей интегрального влагосодержания, выстроенных в хронологическом порядке при дополнительных ограничительных требованиях (непрерывности, гладкости). Наложение полей ИВА на регулярную сетку координат $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ выполнялось при помощи линейной интерполяции ближайших к центру узла сетки измерений. Далее проводилось устранение пропусков данных в полях ИВА. Для SSMIS оказывается возможным устранить лакуны практически полностью, закрывая пропуски в данных с одного спутника данными с другого. Временной промежуток между измерениями разными спутниками DMSP одной и той же точки поверхности медленно варьируется с течением времени и составляет порядка 1—2 часов. За основные поля были приняты данные ИВА со спутника F16, затем пропуски в них были закрыты данными F18 и F17. Оставшиеся незначительные лакуны устраняются линейной интерполяцией данных на их краях.

Применение метода спутникового радиотепловидения позволило получить полные суточные изображения ИВА, убрав лакуны с пропусками данных [17]. К такому изображению применялся адаптируемый порог значения интегрального влагосодержания, превышение которого служит критерием детектирования АР. Суть применения адаптируемого порога [18] заключается в том, что по изображению проходит окно настраиваемого размера, в котором вычисляется среднее значение. Порог t (например, 0,3) задаётся долей от среднего значения. Если значение пикселя меньше, чем t , умноженное на среднее в окне, то ему присваивается 0, если больше, то — 1.

По заданному пороговому значению далее строится бинарная маска областей высокого влагосодержания и проводится их скелетизация — построение «скелетов» выделенных областей. После этого происходит оценка возможной фрагментации скелетов и соединение фрагментов, относящихся к одной АР.

Скелетом в компьютерной графике называется множество точек, равноудалённых от границ фигуры. Скелет подчёркивает геометрические и топологические свойства фигуры, такие как её соединения, связность, длина, направление, ширина [19]. Фактически скелет становится представлением формы фигуры, упрощает её дальнейший анализ. Скелетизация даёт возможность представить бинарное изображение (маску) в виде множества тонких линий, взаимное расположение, размеры и форма которых адекватно описывают размеры, форму и ориентацию в пространстве соответствующих областей изображения АР. Главные задачи скелетизации при детектировании АР: уточнение положения оси АР (линии, вдоль которой ожидаются максимальные потоки водяного пара); объединение фрагментов образа АР в единую фигуру; подготовка к трассировке АР во времени (отождествлению АР на последовательных изображениях за разные сутки и описанию её эволюции).

Одна из проблем в алгоритме выделения АР заключается в подборе порогового значения. Для отработки всей методики исследования АР как единого конвейерного процесса возникла необходимость быстрой реализации ряда ключевых процедур обработки. В связи с этим некоторые из них, предполагающие в дальнейшем значительную автоматизацию на основе накопленной статистики обработки, на первом этапе заменены их упрощёнными аналогами. Так, подбор оптимального порога интегрального влагосодержания на данный момент осуществляется методом визуального перебора. На рис. 1 а в верхней панели представлено изображение ИВА 30 августа 2020 г. На нём схематично отмечены наиболее часто формирующиеся в Северном полушарии атмосферные реки: «Ананасовый экспресс» над Тихим океаном [20] (стрелка «А») и «Майянский экспресс» над Северной Атлантикой [21] (стрелка «М»). Фактические конфигурации обеих АР сильно варьируются в зависимости от крупномасштабных параметров метеорологических полей над соответствующими акваториями. В левой колонке (рис. 1 б) показано обработанное изображение с адаптивным порогом 0,3. Это безразмерная величина — число в диапазоне 0—1. Оно показывает, какая часть пикселей, удовлетворяющих значению выбранного оптимального порога интегрального влагосодержания, будет представлена визуально на переднем плане. Рисунок 1 г в левой колонке демонстрирует скелетизацию, сделанную по бинарной маске с порогом 0,3.

На рис. 1 в правой колонке представлены бинарная маска (в), скелетизация изображения с адаптивным порогом 0,5 (д). Высокое значение чувствительности приводит к выделению большого количества пикселей в качестве переднего плана с риском включения некоторых фоновых пикселей. В дальнейших исследованиях предполагается процесс подбора порогового значения сделать автоматическим.

Применение алгоритма

При проверке алгоритма определения АР возникает закономерный вопрос: насколько устойчива АР, определённая по суточному изображению водяного пара, в пространстве. Наземные реки меняют свои русла, но это происходит довольно медленно, многие десятилетия. Атмосферные реки, в противоположность наземным, очень изменчивы в силу того, что их положение определяется градиентным полем атмосферного давления. Для проверки устойчивости положения АР

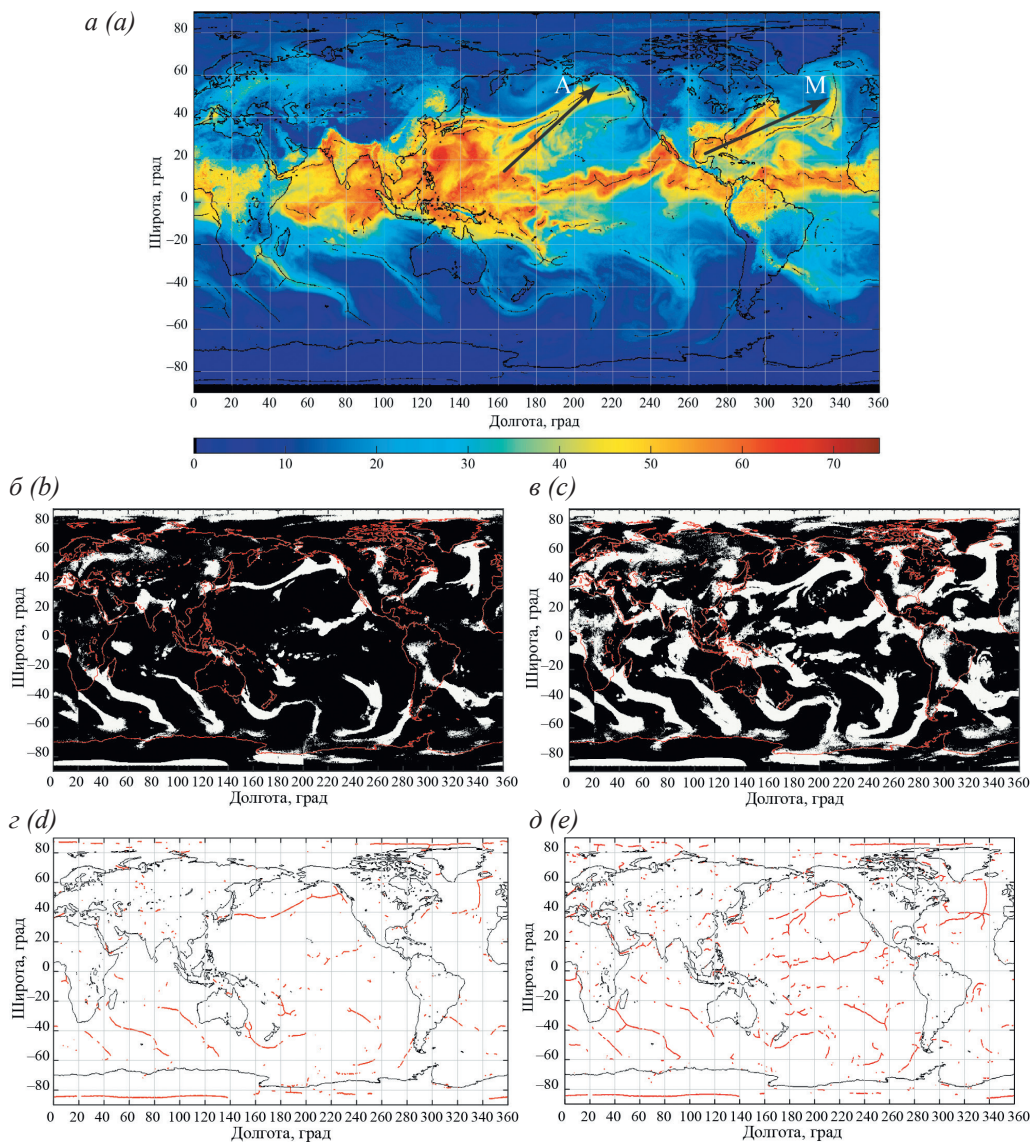


Рис. 1. Изображения ИВА 30.08.2020 (а); в левой колонке представлены обработанные изображения с адаптивным порогом 0,3: б — бинарная маска; г — скелетизация; в правой колонке представлены обработанные изображения с адаптивным порогом 0,5: в — бинарная маска; д — скелетизация; цветовая шкала дана в кг·м⁻².

Fig. 1. Images of the precipitable water vapor on 08/30/2020 (a); the left column shows processed images with an adaptive threshold of 0.3: b — binary mask; d — skeletonization; the right column shows processed images with an adaptive threshold of 0.5: c — binary mask; d — skeletonization; color scale is given in kg m⁻².

на рис. 2 собраны изображения скелетов АР, накопленные помесечно за первую половину 2012 г. Такое представление АР позволяет выделить районы движения АР и проследить их месячные вариации. Изображения скелетов на рис. 2 получены простым арифметическим сложением, что показывает мощность и устойчивость данной АР.

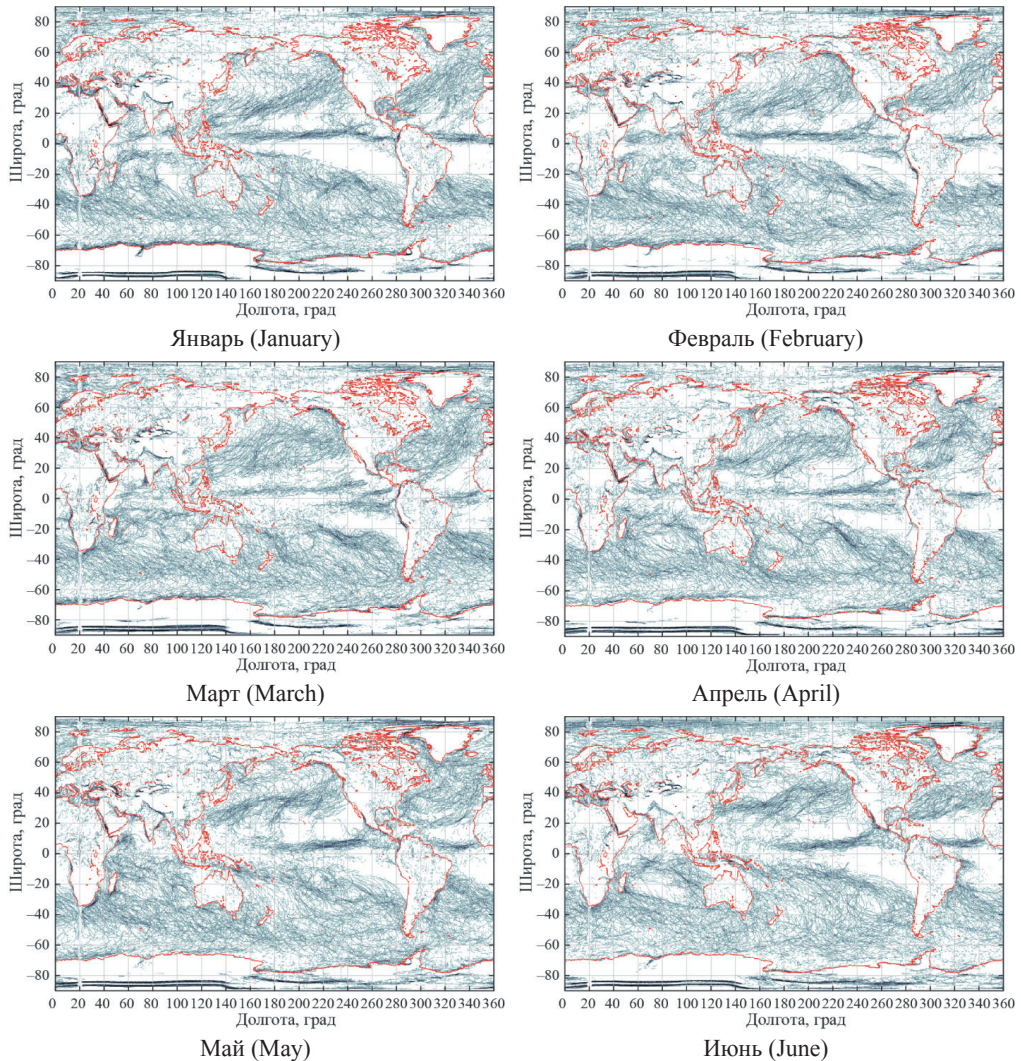


Рис. 2. Изображения скелетов АР, накопленные помесечно за первую половину 2012 г., которые показаны серыми линиями. Красным цветом обозначены материки.

Fig. 2. Images of AR skeletons accumulated monthly for the first half of 2012 are shown with gray lines, continents are indicated in red.

На рис. 3 представлены изображения скелетов АР за тот же период 2012 г., однако помесичное сложение проводилось «логическим» образом, так что показаны все скелеты, которые хоть раз появлялись в этом месяце. Такое представление

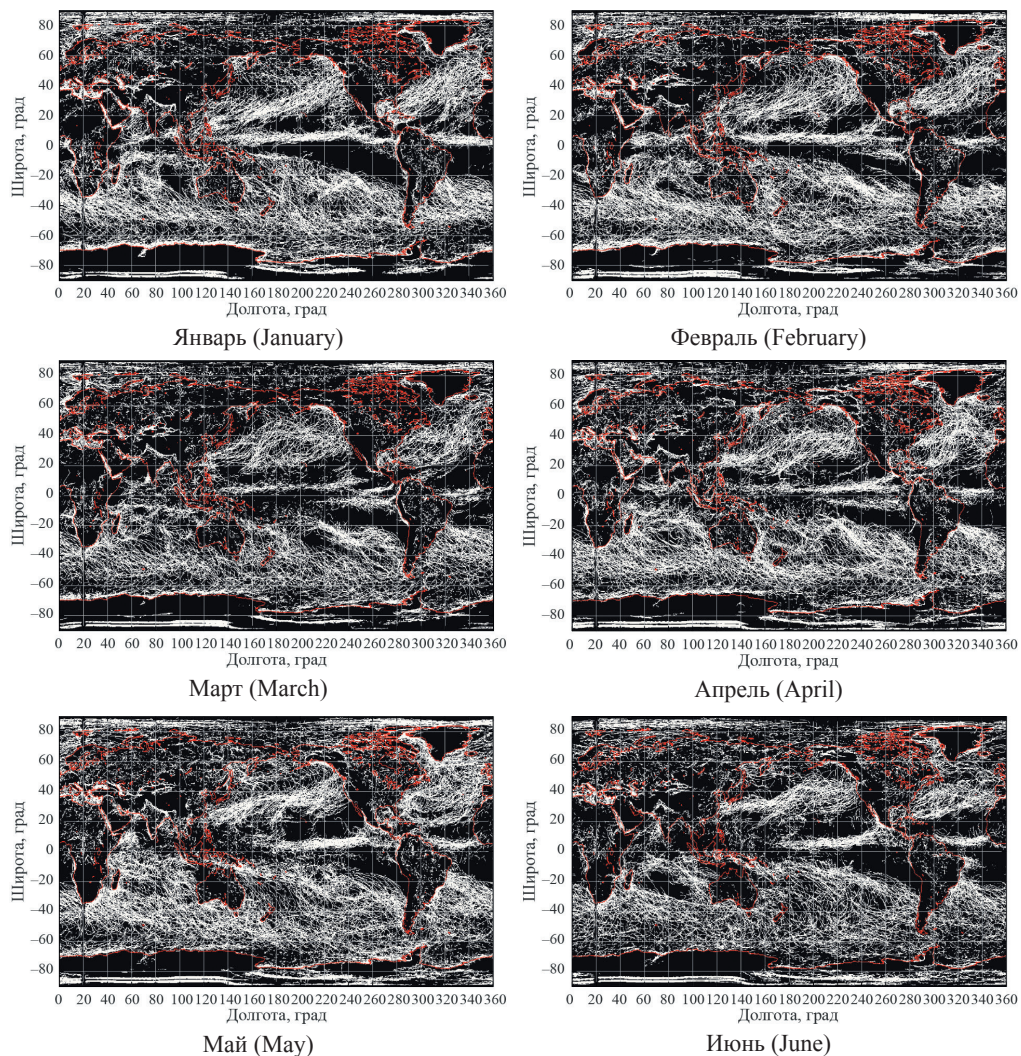


Рис. 3. Изображения скелетов АР, накопленные помесично за первую половину 2012 г. Скелеты АР показаны белыми линиями, красным цветом обозначены материи. Накопление проводилось по бинарным изображениям скелетов АР с помощью логической операции «или».

Fig. 3. Images of AR skeletons accumulated monthly for the first half of 2012. AR skeletons are shown with white lines, continents are indicated in red. Accumulation was carried out using binary images of AR skeletons using the logical operation «or».

АР показывает как их изменчивость, так и тот обширный район, где данная АР проявляется.

Метод спутникового радиотепловидения позволяет наряду с построением глобальных полей водяного пара оценить их горизонтальную адвекцию по специальной методике оценки оптического потока [16], что даёт возможность измерить расход влаги через выбранное сечение АР. На рис. 4 приведено суточное изображение интегрального влагосодержания, в котором оценён расход влаги через сечение, отмеченное чёрным прямоугольником с координатами $10^{\circ} \dots 20^{\circ}$ ю.ш. и 142° з.д. Расход влаги через этот рукав АР составил $27,1 \cdot 10^6$ кг/с на 2 июля 2019 г. 06 часов утра местного времени. Протяжённость АР составила 12° широты, что составляет примерно 1300 км. Чёрными векторами показано направление горизонтальной адвекции, определённое методом спутникового радиотепловидения.

Дальнейшие планы исследований в данном направлении связаны, с одной стороны, с систематическим анализом соответствия выделенных «потенциальных» АР их феноменологическим определениям (по скорости переноса водяного пара, геометрическим размерам и т.д.), построением глобальной и региональной климатологии АР на основе автоматизации процесса детектирования АР; с другой

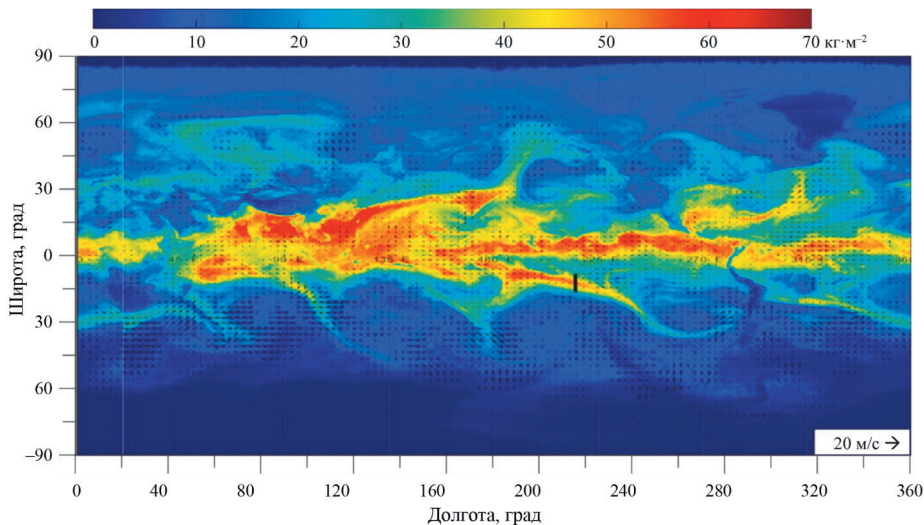


Рис. 4. Суточное изображение ИВА на 2 июля 2019 г. 06:00:00 am. Чёрными векторами показаны направления горизонтальной адвекции, определённые методом спутникового радиотепловидения. Расход влаги через сечение, отмеченное чёрным прямоугольником с координатами $10^{\circ} \dots 20^{\circ}$ ю.ш. и 142° з.д., в АР составляет $27,1 \cdot 10^6$ кг/с.

Fig. 4. Daily image of precipitable water vapor for July 2, 2019 06:00:00 am. Black vectors show the directions of horizontal advection determined by satellite radiothermvision method. Moisture flow through the section marked with a black rectangle with coordinates $10^{\circ} \dots 20^{\circ}$ S, and 142° W, in the AR equals $27.1 \cdot 10^6$ kg/s.

стороны, с выявлением и количественным описанием параметров связи внутри-годовых и межгодовых региональных особенностей формирования АР с развитием чрезвычайных ситуаций, экстремальных погодных явлений и стихийных бедствий и катастроф (наводнений, засух, усиления пожароопасности и др.).

Заключение

По полученным длинным рядам глобальных полей ИВА (2012—2022 гг.) и его адвекции на основе данных микроволновых спутниковых радиометров с использованием метода спутникового радиотепловидения предложена и реализована методика первого этапа детектирования атмосферных рек как над поверхностью Мирового океана, так и над сушей. Представленный алгоритм выделения АР построен на анализе полей ИВА, полученных по данным микроволновых сканеров SSMIS. Использование метода спутникового радиотепловидения позволило получить полные суточные поля ИВА, убрав лакуны с пропусками данных. К таким полям применялся адаптируемый порог значения интегрального влагосодержания, превышение которого служило критерием детектирования потенциальной АР. Далее по заданному пороговому значению были построены бинарные маски областей высокого влагосодержания и проведена их скелетизация.

Проанализировано положение скелетов АР ежемесячно за первую половину 2012 г. Была продемонстрирована сильная изменчивость пространственного положения АР. Вместе с тем, положение и направление наиболее известных и стабильно формирующихся АР чётко выделяется на изображениях. Метод спутникового радиотепловидения позволяет, наряду с построением глобальных полей ИВА, оценить вертикально интегрированный горизонтальный поток водяного пара по специальной методике оценки оптического потока, что даёт возможность измерить расход влаги через выбранное сечение АР. Дальнейшие усилия авторов будут направлены на разработку автоматизированного алгоритма адаптируемого порога значений интегрального влагосодержания для разных сезонов, акваторий Мирового океана и суши, оценки расхода влаги в АР, а также анализа морфологии и временной эволюции АР. Этот шаг позволит перейти к построению региональной климатологии АР и выявлению их вклада в формирование экстремальных погодных условий и стихийных бедствий.

References

1. Newell R. E., Newell N. E., Zhu Y., Scott C. Tropospheric rivers? — A pilot study. *Geophysical Research Letters*. 1992; 19(24):2401—2404. <https://doi.org/10.1029/92GL02916>.
2. Zhu Y., Newell R. E. Atmospheric rivers and bombs. *Geophysical Research Letters*. 1994; 21(18):1999—2002. <https://doi.org/10.1029/94GL01710>.
3. Zhu Y., Newell R. E. A proposed algorithm for moisture fluxes from atmospheric rivers. *Monthly Weather Review*. 1998; 126(3):725—735. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1998\)126<0725:APAF-MF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1998)126<0725:APAF-MF>2.0.CO;2).
4. Cordeira J. M., Stock J., Dettinger M. D. et al. A 142-year climatology of northern California landslides and atmospheric rivers. *Bull. American Meteorological Society*. 2019; 100(8):1499—1509. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0158.1>.

5. Cannon F., Cordeira J. M. Hecht C. W. et al. GPM satellite radar observations of precipitation mechanisms in atmospheric rivers. *Monthly Weather Review*. 2020; 148(4):1449—1463. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-19-0278.1>.
6. 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; (132):1721—1745. doi: 10.1175/1520-0493(2004)132<1721:SACAOO>2.0.CO;2.
7. Ralph F. M., Dettinger M. D. Storms, floods, and the science of Atmospheric rivers EOS. *Trans. American Geophysical Union*. 2011; 92(32):265—266. <https://doi.org/10.1029/2011EO320001>.
8. Rutz J. J., Steenburgh W. J., Ralph F. M. Climatological characteristics of atmospheric rivers and their inland penetration over the western United States. *Monthly Weather Review*. 2014; (142):905—921. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-13-00168.1>.
9. Komatsu K. K., Alexeev V. A., Repina I. A. et al. Poleward upgliding Siberian atmospheric rivers over sea ice heat up Arctic upper air. *Scientific Reports*. 2018; (8):2872. doi: 10.1038/s41598-018-21159-6.
10. Saha S., Moorthi S., Pan H.-L. et al. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bull. American Meteorological Society*. 2010; (91):1015—1058. <https://doi.org/10.1175/2010BAMS3001.1>.
11. Saha S., Moorthi S., Wu X. et al. The NCEP Climate Forecast System version 2. *J. Climate*. 2014; (27):2185—2208. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00823.1>.
12. Gonzales K.R., Swain D.L., Barnes E.A., Diffenbaugh N.S. Moisture-versus wind-dominated flavors of atmospheric rivers. *Geophysical Research Letters*. 2020; 47(23):(e2020GL090042). <https://doi.org/10.1029/2020GL090042>.
13. Nayak M. A., Villarini G. Remote sensing-based characterization of rainfall during atmospheric rivers over the central. *United States J. Hydrology*. 2018; (556):1038—1049.
14. Waliser D., Guan B. Extreme winds and precipitation during landfall of atmospheric rivers. *Nature Geoscience*. 2017; 10(3):179—183. <https://doi.org/10.1038/ngeo2894>.
15. Patricola C. M., Wehner M. F., Bercos-Hickey E. et al. Future changes in extreme precipitation over the San Francisco Bay Area: Dependence on atmospheric river and extratropical cyclone events. *Weather and Climate Extremes*. 2022; (36):(100440). <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100440>.
16. Kunkel D. B., Poe G. A., Boucher D. J. et al. Design and Evaluation of the First Special Sensor Microwave Imager/Sounder. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2008; (46):863—883. doi: 10.1109/tgrs.2008.917980.
17. Ermakov D. *Satellite radiothermography of atmospheric processes: method and applications*. Cham: Springer. 2021: 199 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-57085-9>.
18. Bradley D., Roth G. Adapting Thresholding Using the Integral Image, *J. Graphics Tools*. 2007; 12(2):13—21.
19. Gonzalez R., Woods R. *Digital image processing*. Cham: Pearson. 3rd ed. 2007: 976 p.
20. Lackman G. M., Gyakum J. R. Heavy cold-season precipitation in the northwestern United States: Synoptic climatology and an analysis of the flood of 17–18 January 1986. *Weather and Forecasting*. 1999; 14(5):687—700. doi: 10.1175/1520-0434(1999)014,0687:HCSPIT.2.0.CO.
21. Dirmeyer P.A., Kinter III J. L. The «Maya Express»: Floods in the U.S. Midwest EOS, // *Trans. American Geophysical Union*. 2011; 90(12):101—102. doi: 10.1029/2009EO120001.

Сведения об авторах

Александр Борисович Селунский, ведущий математик, Институт космических исследований РАН, alexendersel@mail.ru.

Владислав Викторович Вакуленко, магистрант, Институт космических исследований РАН, vlad.vv710@gmail.com.

Дмитрий Михайлович Ермаков, доктор. физ.-мат. наук, заведующий отделом, Институт космических исследований РАН; ведущий научный сотрудник, Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, dima@ire.rssi.ru.

Алексей Владимирович Кузьмин, канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией, Институт космических исследований РАН, kuzmin@cosmos.ru.

Евгений Владимирович Пашинов, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник, заведующий лабораторией, Институт космических исследований РАН, pashinove@mail.ru.

Information about authors

Alexander Borisovich Selunsky, leading mathematician, Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences.

Vladislav Viktorovich Vakulenko, master's student, Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences.

Dmitry Mikhaylovich Ermakov, Dr.Sc. (Phys.-mat. Sci.), head of department, Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences; leading scientist, Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences.

Alexey Vladimirovich Kuzmin, Ph.D. (Phys.-Math. Sci.), leading scientist, Head of Laboratory, Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, kuzmin@cosmos.ru.

Evgeny Vladimirovich Pashinov, Ph.D. (Phys.-Math. Sci.), scientist, Head of Laboratory, Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, pashinove@mail.ru.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 26.10.2023

Принята к печати после доработки 15.01.2024

The article was received on 26.10.2023

The article was accepted after revision on 15.01.2024