

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.11.6>

УДК 528.8; 517

АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ И МОНИТОРИНГА АТМОСФЕРНЫХ РЕК

Е. В. Савченко, С. М. Маклаков

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова
Российской академии наук, 141190, г. Фрязино, пл. Введенского, 1

Статья поступила в редакцию 2 ноября 2020 г., после доработки – 24 ноября 2020 г.

Аннотация. Предложен новый адаптивный метод обнаружения атмосферных рек (АР) над поверхностью океана. АР представляют собой нитевидные структуры в поле атмосферного водяного пара, обеспечивающие быстрый перенос влаги из тропиков в средние и высокие широты. В настоящее время сохраняются определенные сложности их обнаружения и мониторинга. Основу метода составляет адаптивный алгоритм вычисления расстояния Джеффриса-Матуситы между областями океана с высоким интегральным содержанием водяного пара и окружающими эти области местами с его фоновыми низкими показателями. Работоспособность разработанного метода подтверждена результатами анализа реальных данных по интегральному содержанию водяного пара в северной части Тихого океана. В целях качественного сравнительного анализа авторами дан краткий обзор методов, применяемых для обнаружения и мониторинга АР, резюмированы работы по исследованию влияния АР на региональные погодные условия, выделены и охарактеризованы отдельные этапы этих исследований, указаны наиболее перспективные аппаратные средства дистанционного зондирования АР. Результаты работы предлагается использовать для повышения точности и надежности автоматизированного обнаружения АР серверными средствами геопортала спутникового радиотепловидения (<https://fireras.su/tpw/>). Результаты работы представляют интерес для мультидисциплинарных исследований, в частности, для прогнозирования среднесрочных атмосферных процессов.

Ключевые слова: атмосферные реки, атмосфера, атмосферные процессы, климат, изучение климата, дистанционное зондирование, спутниковое зондирование, геопортал.

Abstract. A new adaptive method for detecting and monitoring atmospheric rivers (ARs) over the ocean surface is proposed. ARs is the filamentous structures in the field of atmospheric water vapor, which provide a rapid transfer of moisture from the tropics to mid and high latitudes. Currently, certain difficulties remain in their detection and monitoring. The method is based on an adaptive algorithm for calculating the Jeffreys - Matusita distance between areas of the ocean with a high integral water vapor content and the places surrounding these areas with its background low values. The efficiency of the developed method is confirmed by the results of analysis of real data on the integral content of water vapor in the North Pacific Ocean. For the purpose of a qualitative comparative analysis, the authors give a brief overview of the methods used for the detection and monitoring of ARs, summarized the work on the study of the influence of ARs on regional weather conditions, singled out and characterized individual stages of these studies, indicated the most promising hardware for AR remote sensing. The results of the work are proposed to be used to improve the accuracy and reliability of automated AR detection by server means of a geoportal of satellite radio-thermal imaging (<https://fireras.su/tpw/>). The results of the work are of interest for multidisciplinary research, in particular, for predicting medium-term atmospheric processes.

Key words: atmospheric rivers, atmosphere, atmospheric processes, climate, climate study, remote sensing, satellite sensing, geoportal.

Введение

В современном мире, с развитием возможностей сбора данных о состоянии окружающей среды космическими аппаратами на спутниковых платформах, усилением мощностей вычислительной техники, обрабатывающей данные космических наблюдений, а также увеличением объёма баз данных, хранящих огромные многолетние объёмы полученной информации,

появляются всё большие возможности для исследования атмосферных процессов глобального и крупного регионального масштабов. Эти обстоятельства указывают на перспективность использования космических средств дистанционного зондирования для наблюдения атмосферных рек (АР) — нитевидных структур в поле тропосферного водяного пара, вносящих существенный вклад в перераспределение влаги в атмосфере. Они обеспечивают быстрый перенос влаги из зоны тропиков в средние и высокие широты, участвуют в формировании различных атмосферных явлений, в том числе неблагоприятных для человека [1,2]. АР способны вызывать интенсификацию внетропических циклонов над океаном и сушей за счет усиления притока скрытого тепла, а также создавать экстремальные погодные условия над материковым побережьем, что создает существенные угрозы для местной инфраструктуры и населения.

Актуальной задачей является совершенствование методик обнаружения и мониторинга АР средствами ДЗЗ. Одно из требований в рамках этой задачи заключается в максимальной оперативности обработки и анализа дистанционной информации. Этим определяется поставленная в работе цель — создание нового алгоритма обнаружения АР. Созданный алгоритм или результаты его работы целесообразно интегрировать в информационно-аналитические системы, ориентированные на исследования атмосферных процессов и раннее прогнозирование атмосферных катастроф и других чрезвычайных ситуаций. В частности, для повышения точности и надежности автоматизированного обнаружения АР серверными средствами геопортала спутникового радиотепловидения (<https://fireras.su/tpw/>), а также для мультидисциплинарных исследований, в том числе, для прогнозирования среднесрочных атмосферных процессов.

1. Феномен атмосферных рек

История происхождения термина “атмосферные реки” берёт начало в работе [3], где авторы впервые употребили термин “тропосферные реки” при описании сильно вытянутых нитевидных структур в суточных полях

влажностности атмосферы (см. рис.1, красные и жёлтые линии от экватора к средним широтам до побережья Калифорнии, с наибольшим количеством влаги по шкале влажностности справа. Изображение взято с портала <https://fireras.su/tpw/> от 6 апреля 2018 года. Исследуемый участок выделен квадратом). Длина нитевидных структур достигает нескольких тысяч километров, при этом ширина на порядок (в 10-20 раз) меньше, основная отличительная особенность – выраженный локальный максимум значений интегрального влажностности.

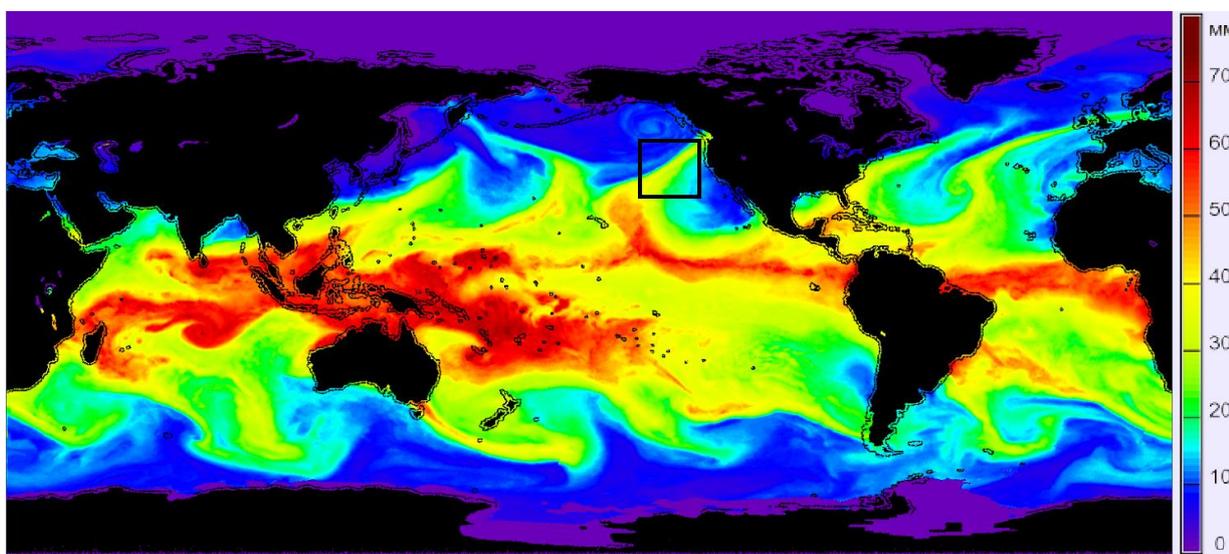


Рис.1. Глобальное поле интегрального влажностности.

Согласно упомянутой работе, эти нитевидные структуры обеспечивают быстрый перенос влаги из тропиков в средние и высокие широты. Исследователями из той же группы в последующей работе по данной тематике [4] был впервые введён термин “атмосферные реки”. Авторы исследовали аспекты взаимодействия атмосферных рек с внетропическими циклонами и показали, что высвобождение скрытого тепла, горизонтальный транспорт которого из тропических областей обеспечивают АР, вносит заметный вклад в усиление циклонов. На основе результатов численного моделирования авторы построили векторные карты потоков скрытого тепла, наложенные на карты атмосферного давления для полудня и полуночи (GMT). Из полученных карт были собраны хронологические ряды карт для отдельных бассейнов Мирового

океана. Это позволило анализировать совокупность указанных карт в виде видеорядов.

В статье тех же авторов [5] был предложен алгоритм выделения в глобальной структуре атмосферной циркуляции таких потоков, которые можно классифицировать как AP, с использованием данных о ветре и влагосодержании атмосферы из Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF). Потоки делятся на нитевидные структуры, известные как атмосферные реки, и то, что авторы называют широкими полями. Результаты исследования показывают, что атмосферные реки могут совершать общий (до 90%) меридиональный перенос влаги, наблюдаемой в внетропической атмосфере, но при этом могут занимать всего около 10% от общей долготной длины на выбранной исследователями 35 широте северного полушария. Предложенный алгоритм расчета общего усреднённого влагосодержания в атмосферном потоке, а также вихревых потоков, точнее учитывал границы “нитевидных структур” в атмосфере и тем самым лучше учитывал долю транспорта атмосферных рек в общем распределении движущихся потоков переноса воды в атмосфере [6, 7].

Влияние конкретных атмосферных рек на погодные явления исследованы, в частности, в работе [1], где были проанализированы AP, которые соединили тропические влагосодержащие области вблизи Гавайских островов с западным побережьем Северной Америки. Они вызвали обильные осадки, приведшие к наводнению в регионе. В работе [8] была исследована AP, прошедшая из Карибского Региона через Мексиканский залив в штат Техас в район Великих Равнин. Эта AP стала причиной сильных дождей в среднезападном регионе США в течение поздней весны и лета. Современное исследование [9] на основе данных за 2002-2014 годы показывает, что вклад AP в общее количество годовых осадков в центральном регионе США составляет более 35%. Большая часть осадков во время активности AP находится внутри области радиусом примерно 150 км вокруг большой оси AP. При этом чётко

установлена связь между продолжительностью существования АР и увеличением продолжительности осадков.

АР, формирующиеся над Атлантическим Океаном, оказывают существенное влияние на погоду стран Западной и Центральной Европы и западной Африки. Например, в работе [10] авторами была установлена связь между крупнейшими наводнениями, происходящими на западе Великобритании в осенний и зимний периоды, с деятельностью АР. Согласно новейшим исследованиям [11], сфера влияния атмосферных рек распространяется даже на регионы Сибири и Арктики, являясь одной из возможных причин быстрого (по сравнению с большинством других регионов) потепления, называемого “арктическим (полярным) усилением”. Эксперименты, проведённые авторами [11], показали, что как наличие морского льда в Арктике, так и достаточный запас влаги в Сибири являются важными факторами формирования сибирских атмосферных рек. АР и морской лед усилили циклоническую активность, а она, в свою очередь, стала причиной дополнительного нагрева тропосферы.

2. Источники экспериментальной информации об АР

Основным источником информации об АР являются данные об интегральном влагосодержании атмосферы. Информация об интегральном содержании водяного пара, которая позволяет производить наблюдение и исследование АР, доступна в результате обработки данных спутниковой аппаратуры, такой, как, например, AMSR-E, AMSR2, GMI, SSM/I, SSMIS, TMI. К моменту появления термина “атмосферные реки” и начала исследования феномена уже существовала спутниковая аппаратура для микроволнового дистанционного зондирования, с помощью которой могли строиться первые карты интегрального влагосодержания атмосферы. Начиная с 1998 года пространственно-временное покрытие данных о содержании водяного пара в атмосфере над поверхностью океана было улучшено, в том числе, с помощью многоканальных сканирующих радиометров SSM/I на спутниках серии DMSP [12]. Это позволило значительно повысить возможности обнаружения и

мониторинга AP. В число спутников, на которых установлена аналогичная аппаратура, в настоящее время входят также Aqua, SUOMI NPP, MADRAS, TRMM, Метеор-3М. Важно отметить, что при этом в исследованиях зачастую используются данные сразу нескольких спутников. Например, в работе [13] атмосферные реки, оказывающие влияние на западное побережье Северной Америки, одновременно наблюдались над северо-восточной частью Тихого океана полярно-орбитальными спутниками CloudSat и Aqua.

На основе полученных данных со спутников создаются информационные продукты, показывающие содержание водяного пара в атмосфере и интенсивность осадков, т.е. те параметры, которые используются при детектировании AP. В частности, в работе [14] авторы провели исследование того, насколько качественно подобные спутниковые продукты отразили вызванные AP сильные осадки в начале 2017 года. В работе были использованы и сопоставлены между собой шесть разных продуктов, а также данные двух наземных радаров. В результате было установлено, что, по сравнению со спутниковой продукцией, наземный метеорологический радар показывает лучшие результаты при обнаружении осадков. Но при этом радары не обеспечивают полного обзора всей контролируемой зоны Тихого Океана из-за сложной микрофизики осадков в прилегающем к нему горном регионе. Радар не может отследить более трети от общего числа осадков.

3. Методы и проблемы обнаружения AP

В настоящее время существует несколько основных подходов, используемых для обнаружения атмосферных рек:

В основе **первого подхода** лежит использование величины интегрального влагосодержания (IWV). По данным спутниковых измерений (например, [15]) строятся поля интегрального влагосодержания атмосферы, к которым применяется известный пороговый критерий. Области с $IWV > 2$ см, больше 2000 км в длину и менее 1000 км в ширину, согласно данной методике, определяются как атмосферные реки. При этом в качестве исходных данных для критериальной оценки можно использовать данные реанализа и/или

модельные оценки, как, например в работе [12]. Данный пороговый алгоритм плохо работает в тропических широтах, где концентрация влаги практически повсеместно имеет высокие значения.

Второй подход включает в себя методы, которые вычисляют параметр IVT (интегральный горизонтальный транспорт водяного пара) с использованием данных реанализа или моделирования в диапазоне атмосферного давления от 1000 до 300 гПа [5]. При этом IVT использует свой пороговый критерий для определения местоположения и границ атмосферных рек. Например, порог IVT_{250} , который определяет атмосферные реки как непрерывный регион более 2000 км длиной с $IVT \geq IVT_{250} = 250 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. Величина этого порога может варьироваться для разных типов регионов, например для АР Сибири в работе [11] было установлено пороговое значение в $200 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, что, как оказалось, не всегда гарантирует, что обнаруженный объект будет АР.

В работе [9] был реализован более гибкий **третий подход**, в рамках которого пороговое значение рассчитывается для каждой точки определённой авторами координатной сетки. Было вычислено среднесуточное значение IVT (взятое из четырех 6-часовых временных шагов) по данным за 1979–2014 гг. Из значений IVT максимальное значение IVT, превышающее этот порог, берется 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% от максимума усредненных значений. Использование дневных порогов учитывает сезонные вариации, которые присутствуют в величине IVT в течение года. Но, как и в первом подходе, у данного метода есть тот же недостаток, свойственный пороговым методам.

Четвертый подход связан с выявлением гидрологических экстремумов, например, экстремальных осадков или наводнений. После выделения экстремумов производится оценка состояния атмосферы с использованием, к примеру, параметров IWV или IVT или относительной влажности в сочетании с

данными о скорости и направлении ветра с тем, чтобы установить возможное наличие атмосферной реки в исследуемой области [12]. В данном методе требуются данные о направлении и скорости ветра в регионе, которые не всегда легкодоступны, особенно для архивных изображений.

В настоящее время появляются международные проекты, призванные оценить качество и эффективность существующих методов и алгоритмов по обнаружению АР. Например, международная ассоциация учёных начала проект Atmospheric River Tracking Method Intercomparison Project (ARTMIP) [16]. Его целью является предоставление научному сообществу информации о различных методиках и помощь с поиском наиболее подходящих методов и алгоритмов для отслеживания АР и понимания механизмов их возникновения. Также оценивается возможность их применения в конкретных областях изучения, таких, как, к примеру, метеорологические исследования или изучение климата. Подобный коллективный подход востребован в связи с тем, что в настоящее время существует множество алгоритмов обнаружения, которые зачастую сильно отличаются друг от друга. Некоторые алгоритмы обнаруживают АР на основе текущего состояния атмосферы в определенный момент времени на определённом участке, в то время как другие отслеживают АР как единый перемещающийся в пространстве объект в течение определённого времени. Например, одни алгоритмы используют абсолютные пороговые значения для определения интенсивности, в то время как другие используют относительные меры, такие как статистические, или подходы, основанные на выявлении аномалий.

4. Новая методика обнаружения АР

Для детектирования областей АР мы предлагаем использовать статистический метод анализа полей интегрального влагосодержания IWV, сравнивая между собой значения среднестатистических показателей IWV для выбранных квадрантов в зоне поиска АР. Алгоритмическая реализация метода включает следующие шаги:

- 1) В анализируемой части океана формируются квадранты размером приблизительно 1 на 1 градус по широте и долготе.
- 2) Для каждого из выделенных квадрантов оцениваются средние и среднеквадратические по пространству значения I WV. Пример расчётов в программе Excel на рис.2.а.
- 3) Для каждого из меридианов выделенной зоны находим максимальные квадрантные значения I WV.
- 4) Оцениваем расстояния от максимальных квадрантных значений до прочих квадрантных значений в заданном широтном интервале, используя для оценок расстояние Джеффриса-Матуситы

$$JM_{12} = 2(1 - e^{-D_{12}}), \quad (1)$$

которое в приближении нормальных распределений I WV можно оценить через расстояние Бхаттачарьи D_{12} [17]:

$$D_{12}(p, q) = \frac{1}{4} \ln \left(\frac{1}{4} \left(\frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} + \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2} + 2 \right) \right) + \frac{1}{4} \left(\frac{(\mu_1 - \mu_2)^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \right) \quad (2)$$

где μ_1 и μ_2 – средние значения; σ_1 и σ_2 – среднеквадратические вариации I WV на участках 1 и 2, соответственно. Расстояние Джеффриса-Матуситы может принимать значения в диапазоне (0;2). Чем выше значение, тем больше различаются точки и, наоборот, при стремлении к нулю они подобны.

- 5) Если расстояние Джеффриса-Матуситы от квадранта с максимальным I WV до проверяемого квадранта меньше определённого порогового значения (в данной работе принимаемого равным единице), то данный квадрант предположительно принадлежит к AP. Пример расчётов в программе Excel на рис.2.б.
- 6) Окончательное решение о принадлежности к AP обеспечивается проверкой на непрерывность, при которой проверяются условия, что соседние квадраты также предположительно принадлежит к AP. Если у квадранта есть соседи, принадлежащие AP, и соседи, для которых не подтверждена принадлежность к AP, то они признаются граничными точками AP.
- 7) В качестве дополнительной проверки оценивается выполнение условия о том, что ширина AP должна быть, по меньшей мере, вдвое меньше длины, а длина

составлять более 20 квадрантов (по 100 км), так как минимальная длина AP по определению считается равной 2000 км.

Для проверки работоспособности метода была выбрана область в Северной части Тихого Океана, лежащая в пределах от 30⁰ с.ш. до 60⁰ с.ш. и от 160⁰ в.д. до 120⁰ з.д. градусов по долготе, где наблюдается регулярное присутствие AP. На геопортале <https://fireras.su/tpw/> было отобрано несколько изображений распределения интегральной влажности для этого участка, два из которых визуально явно содержали в себе AP, а одно, контрольное, не имело. Были выделены небольшие лежащие рядом участки площадью порядка 110 на 110 км (общая площадь участка составила примерно 10000 км²), для которых были произведены расчёты по описанной методике. Результатом стало обнаружение явного присутствия AP в предполагаемой области, непрерывная линейная структура с общими параметрами интегрального влагосодержания. В контрольном участке подобного выявлено не было.

СКО	1	2	3	4	5	6	7	8	9	ДЖМ с максимумом по вертикали (по среднему)									
1	0,31	0,13	0,62	0,39	0,44	0,44	0,24	2,49	3,87	1	41,64	154,3	64	61	139	30,3	96,5	5,61	0,45
2	0,61	0,5	0,34	0,34	0,24	1,14	3,88	5,36	1,81	2	41,54	127,1	82,9	66,7	187	21	4,06	0,48	0,47
3	1,87	0,79	0,84	1,29	3,35	4,24	2,61	0,77	0,5	3	19,13	90,21	55,6	30,2	6,01	1,16	0,69	0	0
4	2,32	3,51	4,66	3,93	2,95	1,67	0,99	2,3	2,61	4	6,136	4,329	1,92	1,22	1	0	0	0	1,49
5	1,89	1,94	1,81	1,16	0,7	2,82	2,88	0,99	0,36	5	1,571	1,165	0,27	0	0	0,08	1,23	2,17	53,4
6	1,17	0,83	1,1	2,4	0,44	1,03	0,41	0,4	0,75	6	0,058	0	0	0,15	1,36	4,06	17,6	3,56	22
7	1,71	3,21	2,64	0,87	2,83	0,38	0,9	0,5	0,46	7	0	0,584	1,47	6,59	32,9	5,31	7,98	2,27	25,4
8	2,17	0,9	0,27	0,27	0,46	0,72	0,36	0,28	0,46	8	1,456	13,16	16,4	10,7	22	2,72	10,7	2,08	20,3
9	0,73	0,38	0,47	0,48	0,44	0,46	0,34	0,43	0,41	9	7,2	29,86	13,3	6,78	14,5	2,29	10	1,63	21,1
Сред	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	13,5	13,9	13,3	12,7	12,5	11,4	10,9	13,1	18,1	1	2	2	2	2	2	2	1,97	0,59	
2	12,5	12,9	12,6	12,1	11,7	11,9	15,5	22,6	28,3	2	2	2	2	2	2	2	1,91	0,62	0,61
3	13,7	13,0	12,9	12,8	15,8	21,4	26,9	29,2	29,4	3	2	2	2	2	1,98	1,19	0,83	0	0
4	21,6	20,3	21,7	23,9	27,2	30,4	30,8	29,2	24,1	4	1,983	1,93	1,55	1,22	1,08	0	0	0	1,37
5	29,4	30,4	31,5	31,8	31,9	29,7	24,8	22,1	20,4	5	1,408	1,189	0,38	0	0	0,12	1,23	1,63	2
6	35,2	34,7	33,5	31,0	26,1	22,5	21,9	21,1	21,0	6	0,087	0	0	0,22	1,3	1,91	2	1,87	2
7	35,8	31,5	26,9	24,4	23,4	22,8	23,3	22,8	22,5	7	0	0,728	1,36	1,99	2	1,97	2	1,66	2
8	29,2	25,8	24,4	24,2	24,0	24,6	24,0	23,8	23,3	8	1,352	2	2	2	2	1,76	2	1,6	2
9	26,0	24,7	24,8	25,4	25,6	25,5	24,3	24,2	23,5	9	1,992	2	2	1,99	2	1,66	2	1,43	2

Рис.2.а. (слева) Расчёт среднеквадратичного отклонения и средних значений для данных в каждом квадранте. Жёлтым цветом выделены максимальные значения в каждом меридиане.

Рис.2.б. (справа) конечный этап расчёта местоположения AP. Красным цветом выделены области с максимальными значениями, красным и оранжевым – места с предполагаемым наличием AP.

Также, путём произведения ширины найденной реки (по долготе) на её длину, можно косвенно оценить её интенсивность для автоматического определения мощности переносимого ей потока влаги.

Указанный метод детектирования АР является более гибким, чем ряд представленных выше, так как его можно применить в большем количестве случаев в любых широтах, без привлечения дополнительных данных.

Он, как и остальные подходы, может быть реализован на базе автоматизированных систем для обработки данных, внедрение и развитие возможностей которых может позволить в обозримом будущем автоматически выделять АР и предсказывать их последствия. Для реализации данной возможности необходимо, в первую очередь, создать общую базу данных параметров, которые будут использованы для более точного определения АР, с привлечением как можно большего числа независимых источников, которые затем необходимо сопоставить между собой. Эта база данных может стать фундаментом для создания на её основе тематических геопорталов, доступных для широкого круга исследователей, с помощью которых можно добиться консолидированного прогресса в изучении данной темы.

В настоящее время в мире существует множество различных баз данных космических снимков с открытым доступом, которые всё чаще приобретают вид геопорталов, на которых можно не только визуально выбрать дату и область на карте и сохранить связанный с ними снимок, но и провести с ним определённые преобразования. Существенным недостатком является то, что набор данных на этих ресурсах и форматов их представления разнится между собой. И следующим логичным шагом является появление геопорталов, которые могут собирать данные из множества распределённых архивов, преобразовывать их для успешной интеграции и получения необходимого для пользователя конечного продукта.

В лаборатории № 301 ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН сотрудниками был создан геопортал на серверах для объединения и совместного анализа спутниковой информации на принципах виртуальной интеграции

пространственно распределенных архивов и баз данных ДЗЗ. Он располагается по адресу <https://fireras.su/tpw/>. Его данные, представляемые в виде карт параметров влагосодержания над поверхностью Земли, можно использовать для дальнейшего изучения атмосферных рек. Его интерфейс представлен на рис.3. Также физические параметры, указанные нами ранее, можно применить для создания базы данных атмосферных рек, в том числе и для геопортала спутникового радиотепловидения.

Геопортал спутникового радиотепловидения является важным инструментом удаленной обработки и совместного анализа дистанционных данных в интересах широкого класса прикладных и фундаментальных задач дистанционного зондирования Земли. К ним, в частности, относятся задачи анализа глобальных климатических изменений, региональной изменчивости погоды и климата, развития и эволюции быстропротекающих процессов в атмосфере, океане и на суше, в том числе катастрофического характера, а также диагностика и анализ последствий природных и техногенных катастроф.

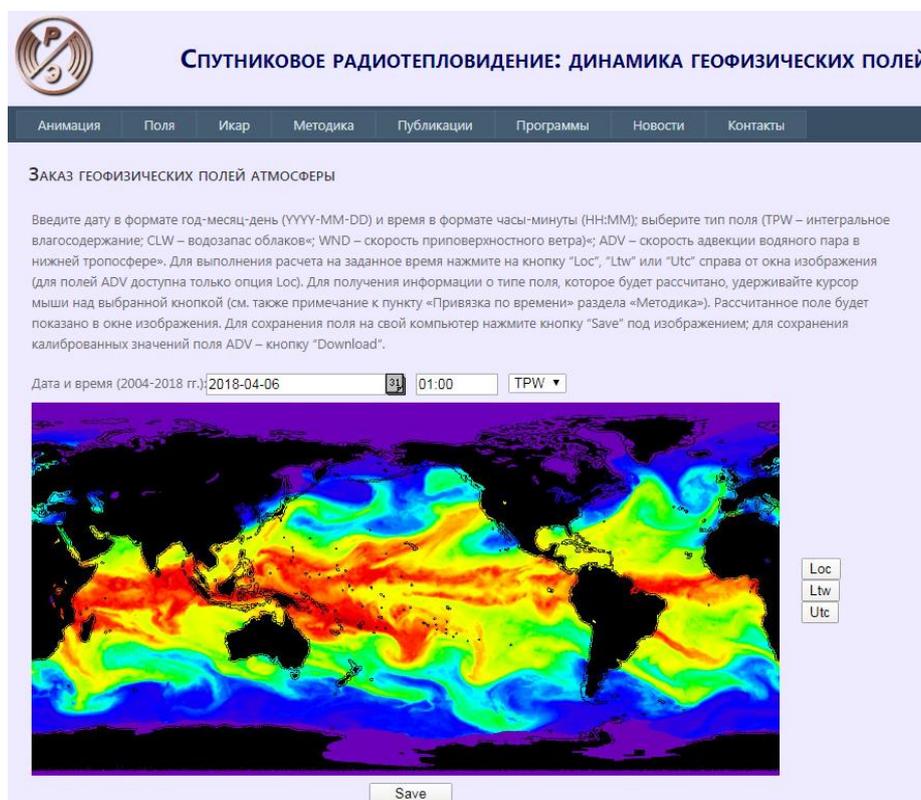


Рис.3. Интерфейс геопортала спутникового радиотепловидения.

На сайте можно посмотреть данные по основным параметрам влагосодержания атмосферы на любую выбранную дату и время за период последних пятнадцати лет, также здесь присутствуют уже готовые анимированные изображения полей влагосодержания над всей поверхностью Земли. Отдельно на сайте присутствует ещё один продукт - калькулятор “ИКАР” (Интерактивный Калькулятор для Атмосферных Расчетов), который позволяет проводить самому пользователю необходимые вычисления различных параметров на основе спутниковых изображений. Процесс производится при помощи расчётных формул, задаваемых пользователем по определённому шаблону.

Подробнее структуре и возможностях портала можно посмотреть в работе [18].

Преимущества геопортала заключаются в систематически внедренном подходе к динамическому представлению и анализу доступных данных. Ценность этого подхода будет увеличиваться за счет синергетического эффекта при виртуальной интеграции в портал как можно более представительных и разнотипных массивов дистанционных наблюдений Земли [19].

Выводы

В настоящей работе были представлены методики исследования феномена атмосферных рек, а также указаны проблемы и задачи, возникающие перед исследователями. Также авторами был предложен новый метод определения АР над поверхностью океана с использованием сравнения точек интегрального влагосодержания методом вычисления расстояния Джеффриса-Матуситы. Были проведены расчёты, показавшие работоспособность данного метода. Также были резюмированы результаты исследований связи атмосферных рек с эволюцией крупномасштабных атмосферных процессов и с формированием экстремальных погодных условий в прибрежных районах. Исследование атмосферных рек средствами ДЗЗ имеет целый ряд сильных сторон по сравнению с наземными способами. В них входит оперативность получения данных, возможность регулярного мониторинга, а также

пространственный охват, значительно превосходящий тот, что может быть реализован при измерениях с земной поверхности. Широкий диапазон спектральных каналов и наличие на орбите целого ряда приборов одновременно предоставляют возможности для детального и качественного исследования. Открытость доступа к данным делает их доступными для широкого круга исследователей. Вместе с тем встают вопросы интеграции полученных данных между собой, сравнительного анализа, унификации различных методик обработки и интерпретации данных. В связи с этим была подчеркнута возрастающая роль автоматизированных систем-геопорталов для сбора и обработки спутниковых данных. Их количество во всём мире на данный момент невелико, что делает их разработку, а также вопросы интеграции в них данных из различных источников приоритетным направлением для современных исследователей.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме Космос № 0030-2019-0008 и часть работы, методы обнаружения AP, поддержана проектом РФФИ 20-07-00680А.

Литература

1. Lackmann 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. Vol.14. No.5. P.687-700.
2. Waliser D., Guan B. Extreme winds and precipitation during landfall of atmospheric rivers // *Nature Geoscience*. 2017. Vol. 10. P.179–183.
3. Newell R.E., Newell N.E., Zhu Y., Scott C. Tropospheric rivers? – A pilot study // *Geophysical Research Letters*. 1992. Vol.19. P.2401-2404.
4. Zhu Y, Newell R.E. Atmospheric rivers and bombs // *Geophysical Research Letters*. 1994. Vol.21.No.18. P.1999-2002.
5. Zhu Y., Newell R.E. A proposed algorithm for moisture fluxes from atmospheric rivers. // *Mon. Weather Rev.* 1998. Vol.126 (3). P.725–735.

6. Ermakov D.M. Satellite Radiothermovision of Atmospheric Processes: Method and Applications. Springer Praxis Publishing, 2020. Chapter 5. P.121 – 150.
7. Ermakov D.M., Sharkov E.A., Chernushich A.P. Satellite radiothermovision on synoptic and climatically significant scales. // *Izvestiya Atmos. Oceanic Phys.* 2017. Vol.59. No.9. P.973–978.
8. Dirmeyer P, Kinter J.L. The Maya Express: floods in the U.S. Midwest. 2009. <https://doi.org/10.1029/2009EO120001>.
9. Nayak M.A., Villarini G. Remote sensing-based characterization of rainfall during atmospheric rivers over the central United States // *Journal of Hydrology.* 2018. Vol.556. P.1038–1049.
10. Lavers D.A., Allan R.P., Wood E.F., Villarini G., Brayshaw D.J., Wade A.J. Winter floods in Britain are connected to atmospheric rivers // *Geophysical Research Letters.* 2011. Vol.38., L23803.
11. Komatsu K.K., Alexeev V.A., Repina I.A., Tachibana Y. Poleward upgliding Siberian atmospheric rivers over sea ice heat up Arctic upper air // *Scientific reports.* 2018. Vol.8. P.2872. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21159-6>
12. Ralph F.M., Dettinger M.D. Storms, floods, and the science of Atmospheric rivers // *EOS, Transactions, American Geophysical Union.* 2011. Vol.92. No.32. P.265–266.
13. Matrosov S.Y. Characteristics of Landfalling Atmospheric Rivers Inferred from Satellite Observations over the Eastern North Pacific Ocean // *Monthly Weather Review.* 2013. Vol. 141. P.3757-3768.
14. Wen Y., Behrangi A., Chen H., Lambrigtsen B. How well were the early 2017 California Atmospheric River precipitation events captured by satellite products and ground-based radars? // *Q J R Meteorol. Soc.* 2018. Vol.144 (Suppl. 1), P.344–359.
15. 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. Vol.132. P.1721-1745.

16. Shields C. A. et al. Atmospheric River Tracking Method Intercomparison Project (ARTMIP): project goals and experimental design // *Geosci. Model Dev.* 2018. Vol.11. P.2455–2474.
17. Kailath T. The Divergence and Bhattacharyya Distance Measures in Signal Selection // *IEEE Transactions on Communication Technology.* 1967. Vol.15. P.52-60.
18. 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.
19. Савченко Е. В., Маклаков С.М., Васильев В. С. Развитие технологий виртуальной интеграции данных спутникового мониторинга земли в геопортале спутникового радиотепловидения // *Сборник тезисов докладов XV Конференция молодых ученых "Фундаментальные и прикладные космические исследования".* 11-13 апреля 2018 г., Москва. ИКИ РАН, р. 93.

Для цитирования:

Савченко Е.В., Маклаков С.М. Адаптивный алгоритм обнаружения и мониторинга атмосферных рек. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал].* 2020. №11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.11.6>