

Спутниковое радиотепловидение тонкой структуры глобальной атмосферной циркуляции

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

Представлен алгоритм анализа «нитевидной» структуры атмосферной циркуляции, направленный на детектирование и локализацию осей предполагаемых атмосферных рек в поле интегрального влагосодержания атмосферы. В отличие от ранее предложенных, алгоритм универсально применим над всеми бассейнами Мирового океана, несмотря на существенные различия параметров атмосферных рек над акваториями разных океанов. В ходе разработки и тестирования алгоритма был получен результат, который предположительно свидетельствует о том, что воздушные массы средних широт представляют собой двухфазную смесь, никогда не приходящую в полностью однородное состояние вследствие возмущающих воздействий тропических и полярных воздушных масс. Этот предварительный результат следует изучить более детально на репрезентативном объеме дистанционных данных.

Программная реализация представленного алгоритма обеспечила возможность дальнейшего систематического изучения роли атмосферных рек в глобальном меридиональном переносе атмосферного скрытого тепла на климатически значимых масштабах времени.

An algorithm is presented for analyzing the "filamentary" structure of atmospheric circulation, aimed at detecting and localizing the axes of the proposed atmospheric rivers in the field of the integral moisture content of the atmosphere. Unlike the previously proposed, the algorithm is universally applicable over all the basins of the World Ocean, despite the significant differences in the parameters of atmospheric rivers over the waters of different oceans.

During the development and testing of the algorithm, a result was obtained that supposedly indicates that mid-latitude air masses are a two-phase mixture that never arrives at a completely homogeneous state due to the disturbing effects of tropical and polar air masses. This preliminary result should be studied in more detail on the representative volume of remote data.

The software implementation of the presented algorithm provided an opportunity for further systematic study of the role of atmospheric rivers in the global meridional transport of atmospheric latent heat at climatically significant time scales.

Введение

В [1] дан краткий обзор работ, посвященных исследованиям «нитевидной структуры» полей интегрального влагосодержания (ИВС) атмосферы и «атмосферных рек» (АР). Последний термин был введен неформально [2-4] для обозначения сравнительно узких (до 500/1000 км), протяженных (более 2000 км) областей нижней тропосферы [5], осуществляющих быстрый перенос атмосферной влаги из низких широт в умеренные и высокие. Так, в работе [4] на основании численного моделирования сделан вывод о том, что АР обеспечивают до 90% всего меридионального переноса скрытого тепла в области умеренных широт. Надо отметить, однако, что непосредственная проверка этих оценок с помощью данных дистанционных (спутниковых) измерений затруднена. Чаще всего речь идет об исследовании характеристик отдельных АР в случаях, когда сочетания различных условий (в том числе, параметров спутниковых орбит) сложились наиболее удачным образом [6]. Для систематического подхода к изучению АР дистанционными средствами необходимо решить ряд методических проблем, обсужденных в [7,1].

В работе [1] показано, как преодолению этих проблем способствует применение алгоритмов спутникового радиотепловидения. Подробное обсуждение указанных алгоритмов приведено в [8] и цитируемых там работах. Настоящая работа исходит из того, что применение этих алгоритмов позволяет получить глобальное поле ИВС над океанами полного покрытия (без пропусков) на регулярной координатной сетке с шагом $0,25^\circ$ и с шагом по времени 3 часа. Предложен и обсужден алгоритм анализа тонкой структуры поля ИВС, направленный на автоматическое детектирование образов потенциальных АР и локализации их осей в поле ИВС и универсально применимый над всеми акваториями Мирового океана.

Синтез расчетной схемы

По указанной выше причине неоднозначности термина «атмосферные реки», подход к анализу тонкой структуры атмосферной циркуляции основан на формальном поиске всех элементов (объектов) в поле ИВС, удовлетворяющих нескольким критериям отбора: значительная протяженность (> 2000 км); малая ширина (< 1000 км); локально максимальный градиент значений ИВС на границах объектов (особенно в средних широтах); значительный широтный охват (от границ внутритропической зоны конвергенции, ВЗК, до высоких широт). В качестве дополнительных условий полезно учитывать морфологию выделенных объектов (односвязность, отсутствие циклов) и время их существования (несколько суток).

Предложенная и описанная ниже схема автоматического детектирования АР и АР-подобных явлений в поле ИВС проиллюстрирована в общем виде на рис. 1. В левой части рис. 1 перечислены основные алгоритмические шаги схемы. В правой части на конкретном примере обработки проиллюстрированы этапы преобразования данных, позволяющие в итоге наложить на поле ИВС оси потенциальных (автоматически детектированных в соответствии с указанными выше критериями) АР. Ниже этапы обработки рассмотрены более детально.

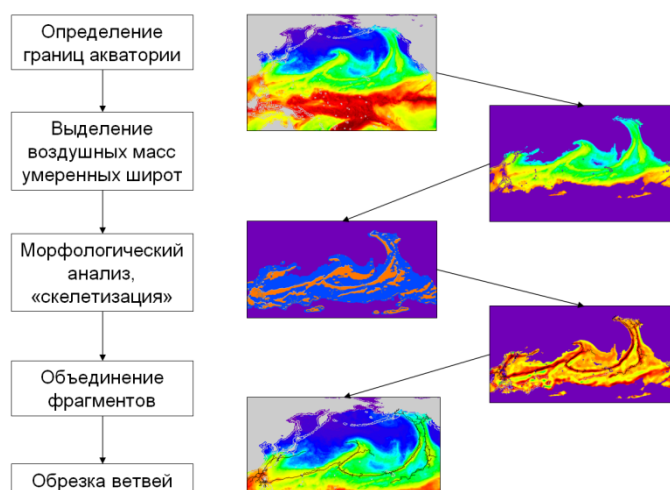


Рис. 1. Схема автоматического детектирования атмосферных рек в поле интегрального влагосодержания атмосферы.

Определение границ акватории

Поскольку, как указано в [7], среднестатистические характеристики АР могут зависеть от географического положения, имеет смысл выполнять детектирование АР в поле ИВС над разными акваториями по отдельности. Выделено пять крупных акваторий: северная и южная части Тихого океана, северная и южная Атлантика и

Индийский океан. Для однозначного определения акватории достаточно задать ее западную и восточную границы (по фиксированным меридианам), а также указать южное или северное полушарие. Обработка данных осуществляется на регулярной координатной сетке, и задание западной и восточной границ акватории соответствует заданию минимального и максимального индекса столбцов сетки i_{\min} , i_{\max} . В высоких широтах предложено фиксировать границу акватории на параллели 70° . В низких широтах возникает проблема отделения области повышенных значений ИВС, ассоциированных с АР, от области ВЗК [7]. С этой целью для фиксированного значения индекса столбца i , $i_{\min} \leq i \leq i_{\max}$ рассчитывается индекс строки (вертикальная координата узла) j_0 по следующему правилу:

$$j_0 = \sum_{j=j_{20S}}^{j_{20N}} j \cdot W(i, j) / \sum_{j=j_{20S}}^{j_{20N}} W(i, j), \quad (1)$$

где j – номер столбца, пробегающий все значения между индексами, соответствующими 20° южной широты и 20° северной широты;

W – значение поля ИВС в узле (i, j) .

Таким образом, j_0 – положение «центра масс» значений ИВС на данной долготе в пределах широтного пояса $\pm 20^\circ$. Он используется в качестве нижней границы акватории на данной долготе.

Выделение воздушных масс умеренных широт

Одной из наиболее специфических характеристик АР является существенное превышение значений ИВС внутри нее над «фоновыми» значениями, особенно ярко проявляющееся вне области ВЗК. При этом, однако, детектирование такого превышения с помощью простейшей пороговой фильтрации с абсолютными предельными значениями наталкивается на существенные трудности [1,7].

Важную роль играет выделение на анализируемом фрагменте поля ИВС воздушных масс умеренных широт. Следует отметить, что в целом классификация воздушных масс по типам и используемая в связи с этим терминология не являются вполне устоявшимися и различные их варианты могут применяться в контексте разных задач [9]. В данном случае оказалось удобным рассмотреть три типа воздушных масс над океаном: арктические (антарктические), тропические и средних широт, ср. [9]. Была принята предварительная гипотеза о том, что воздушные массы каждого из трех типов характеризуются нормальным законом распределения значений ИВС относительно некоторого среднего, являющегося функцией типа воздушных масс и меняющегося в некоторых пределах в зависимости от акватории, сезона и (возможно) других факторов.

Алгоритм аппроксимации сглаженной гистограммы суммой гауссовых функций реализован итерационно. Обозначим через $h(w)$ число узлов, входящих в рассматриваемый фрагмент поля ИВС, значение ИВС в которых равно w . Таким образом, $h(w)$ – исходная гистограмма фрагмента поля ИВС. Результат ее сглаживания обозначим $\hat{h}(w)$. Методом подбора установлено, что удовлетворительные результаты сглаживания получаются при усреднении значений $h(w)$ в скользящем окне шириной 7 единиц (т.е. 7 кг/м^2), рис. 2.

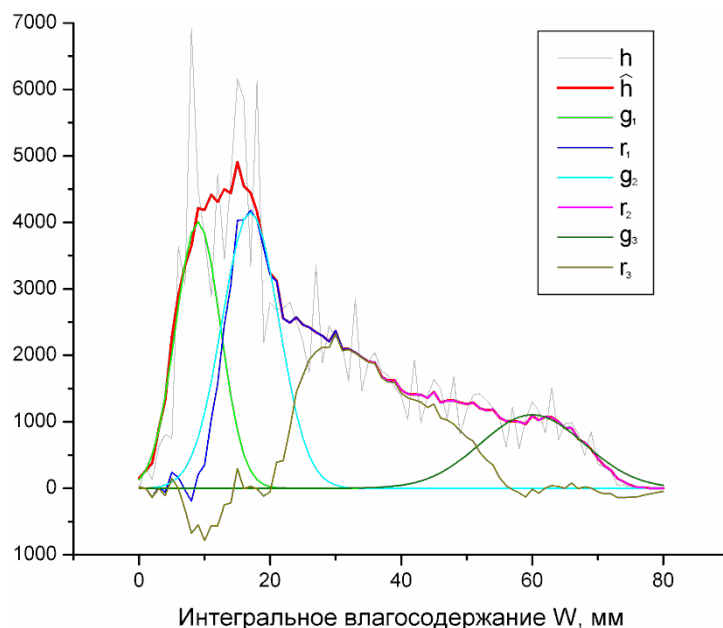


Рис. 2. Этапы аппроксимации гистограммы значений ИВС суммой гауссовых функций, см. пояснения в тексте.

На сглаженной гистограмме находится положение первого (ближайшего к 0) локального максимума w_1 по следующему правилу:

$$\hat{h}(w_1) \geq \hat{h}(w), \quad w = 0..15. \quad (2)$$

Предельное значение диапазона поиска в 15 кг/м^2 установлено эмпирически на основе анализа большого объема данных. Затем осуществляется подбор оптимальных параметров A и σ^2 гауссовой функции, аппроксимирующей $\hat{h}(w)$ на ближнем к краю склоне и в окрестности найденного локального максимума:

$$\hat{h}(w) \approx g_1(w) \equiv A_1 \cdot \exp\left(-\frac{(w-w_1)^2}{\sigma_1^2}\right), \quad 0 \leq w \leq 1,5 \cdot w_1. \quad (3)$$

С этой целью задача приводится к линейному виду путем логарифмирования

$$\ln(\hat{h}(w)) \approx \ln A_1 - \frac{(w-w_1)^2}{\sigma_1^2} \quad (4)$$

и решается классическим методом наименьших квадратов относительно неизвестных $\ln A_1$ и σ_1^2 при фиксированном w_1 , рис. 2.

Далее вычисляется остаточная часть сглаженной гистограммы в виде

$$r_1(w) = \hat{h}(w) - g_1(w), \quad (5)$$

для которой осуществляется поиск нового (ближайшего к нулю) локального максимума на отрезке $[2w_1, 40]$, где $w_1 \leq 15$ – положение первого локального максимума. Как и ранее, второе граничное значение в 40 кг/м² установлено эмпирическим путем. Далее снова решается задача аппроксимации новой гауссовой функцией $g_2(w)$ при известном положении локального максимума w_2 . Полученные параметры A_2 и σ_2^2 , по аналогии с (3) – (5), используются для вычисления нового остатка $r_2(w)$. Наконец, осуществляется поиск локального максимума остатка $r_2(w)$, w_3 , наиболее близкого к максимальным значениям w , из условия:

$$r_2(w_3) \geq r_2(w), w > 40. \quad (6)$$

Решается задача аппроксимации правого крыла гистограммы гауссовой функцией $g_3(w)$ при известном положении максимума w_3 и оптимизируемых A_3 и σ_3^2 . Полученные параметры используются для вычисления остатка $r_3(w)$:

$$r_3(w) = r_2(w) - g_3(w). \quad (7)$$

В итоге, определяется диапазон значений w , соответствующих воздушным массам умеренных широт на рассматриваемом фрагменте поля ИВС. Нижнее значение, w_{\min} , определяется по пересечению $g_1(w)$ и $g_2(w)$. Верхнее значение, w_{\max} , определяется по пересечению $g_3(w)$ и $r_3(w)$. Выделяется множество улов сетки, содержащих значения ИВС $w_{\min} \leq w \leq w_{\max}$, и дальнейший анализ проводится только выделенного множества. Действительно, приведенный алгоритм успешно локализует область, в которой расположена потенциальная атмосферная река, рис. 3в. Представляет интерес тот факт, что остаток $r_3(w)$, вопреки исходному предположению, в большинстве рассмотренных случаев не является всюду близкой к нулю величиной, а может быть удовлетворительно аппроксимирован еще одной гауссовой функцией, рис. 2. Можно выдвинуть предположение, что воздушные массы умеренных широт (понимаемые в указанном выше смысле) с точки зрения распределения значений ИВС представляют собой двухфазовую смесь, практически не приходящую в однородное состояние под возмущающим воздействием граничащих с ними тропических и арктических/антарктических воздушных масс. Тем не менее, как уже отмечено, нарушение исходной гипотезы не сказывается на возможности эффективной локализации области узлов, относящейся к проявлению AP в поле ИВС. Это позволяет успешно реализовать следующие шаги автоматического анализа.

Морфологический анализ

Процедура анализа состоит из двух алгоритмически аналогичных частей: поиска длительно-протяженных фрагментов осей AP и поиска широтно-протяженных фрагментов осей AP.

Шаг **медианной фильтрации** применен для сглаживания исходного поля ИВС, поскольку величина и знак производной поля чувствительны к выбросам, которые могут быть связаны как с отдельными ошибками восстановления значений ИВС, так и с

шумами дискретизации. Фильтрация реализована в скользящем квадратном окне 7×7 узлов.

Шаг **разметки склонов и плато** состоит в том, что каждому узлу сетки приписывается целочисленный индекс «локального наклона» $S(i, j)$ производной сглаженного поля ИВС $\dot{W}(i, j)$ вдоль меридиана:

$$S(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{если } \dot{W}(i, j+1) > \dot{W}(i, j), \\ 0, & \text{если } \dot{W}(i, j+1) = \dot{W}(i, j), \\ -1, & \text{если } \dot{W}(i, j+1) < \dot{W}(i, j). \end{cases} \quad (8)$$

Цель этого шага – найти множество узлов, где возникают локальные максимумы сглаженного поля ИВС, локализовав фрагменты оси AP как границы между «склонами», обращенными на север и на юг, соответственно. Однако, выполненное на предыдущем шаге сглаживание приводит к тому, что поле вблизи этой границы образует «плато». Для получения границы в виде линейного объекта (с поперечным размером, составляющим один-два узла сетки) дополнительно выполняется процедура **продления склонов**. Она выполняется итерационно до тех пор, пока итерации меняют хотя бы одно нулевое значение $S(i, j)$ на ненулевое по следующему правилу. Если среди значений в соседних узлах $S(i-1, j)$, $S(i+1, j)$, $S(i, j-1)$, $S(i, j+1)$ есть хотя бы одно ненулевое, то новое значение $S'(i, j)$ принимается равным 1, если среди перечисленных выше положительных больше, чем отрицательных, иначе $S'(i, j)$ принимается равным -1. Если значения индекса склона во всех соседних узлах нулевые, то $S'(i, j)$ принимается равным 0. Смысл описанной процедуры заключается в том, что узлу плато, граничащему с одним из склонов, приписывается направление этого склона. В результате, индекс наклона во всех узлах анализируемой области приобретает ненулевое значение.

Далее осуществляется **процедура локализации гребней** (фрагментов осей потенциальной AP). Узлы, находящиеся на границе склонов с разными знаками, помечаются как относящиеся к оси потенциальной AP, для чего формируется маска

$$A(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{если } S(i, j) = 1 \text{ и } S(i, j+1) = -1, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (9)$$

Объединение фрагментов

Шаг объединения фрагментов направлен на восстановление максимально полных образов осей AP в поле ИВС, фрагментация которых связана с существенной сменой направления их распространения. При автоматическом детектировании предпочтение отдано поиску долготно-ориентированных фрагментов, составляющих основу реконструированных осей AP. Однако при этом возникают разрывы образов осей AP в областях, где они имеют преимущественно широтную направленность. Дополнительно осуществляется поиск широтно-ориентированных гребней, которые соединяют между собой два долготно-ориентированных гребня. Алгоритмически этот шаг вполне аналогичен описанному выше. Приоритет долготно-ориентированных гребней обеспечивается тем, что все они на данном этапе обработки сохраняются в качестве

потенциальных осей AP. Широтно-ориентированные гребни сохраняются лишь в том случае, если соединяют между собой два долготно-ориентированных фрагмента.

Обрезка ветвей

Процедуры объединения гребней и фрагментов приводят к образованию ряда ложных решений. Для их исключения реализована дополнительная операция фильтрации. Осуществляется проверка того, что оси проходят в окрестности максимума второй производной сглаженного поля ИВС путем применения конечно-разностного аналога оператора Лапласа к полю $\hat{W}(i, j)$. На заключительном шаге фильтрации выполняется простейший отсев фрагментов по линейным размерам.

Заключение

В качестве примера обработки показан результат автоматического детектирования осей AP в поле ИВС над Тихим, Индийским и Атлантическим океанами, рис. 3.

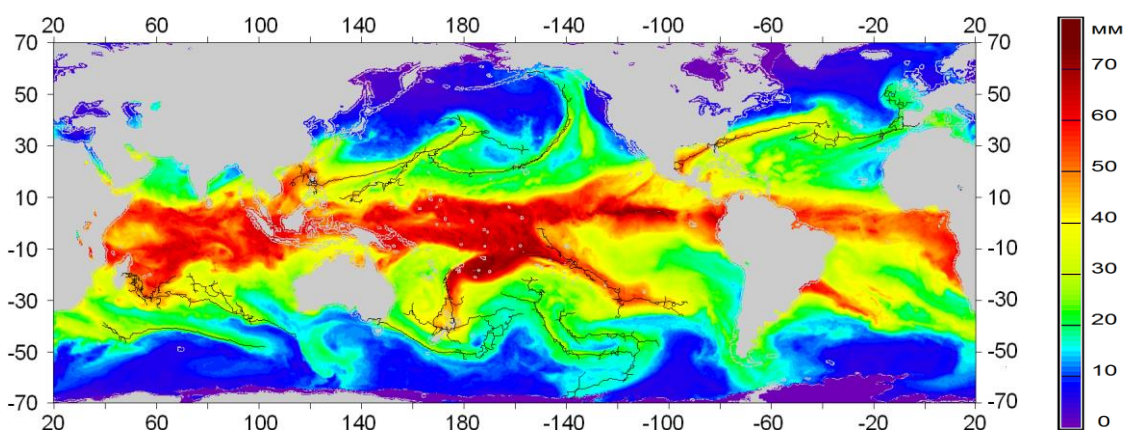


Рис. 3. Детектированные оси атмосферных рек над Северной Атлантикой, Тихим и Индийским океанами на фоне поля интегрального влагосодержания атмосферы; цветовая шкала значений ИВС (в мм) справа; по краям изображения – географические координаты в градусах широты и долготы (отрицательные – для южного и западного полушарий).

Видно, что в целом реализованный алгоритм детектирования удовлетворительно справляется с задачей выделения тонкой структуры поля ИВС над Мировым океаном. Это обеспечивает возможность дальнейшего систематического исследования полученной нитевидной структуры с целью выяснения ее роли в меридиональном переносе скрытого тепла в глобальных масштабах и на климатически значимых интервалах времени. Интерес представляет и результат обработки гистограммы значений ИВС, устойчиво воспроизводящий особенность воздушных масс средних широт как двухфазной смеси, представляемой суммой двух гауссовых распределений. Этот вопрос заслуживает отдельного изучения на статистически значимых объемах спутниковой информации.

Литература

1. Ермаков Д.М. Климатология атмосферных рек: возможности спутникового радиотепловидения // VII Всероссийские Армандовские чтения. Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн. Материалы Всероссийской научной конференции. –Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2017. –465 С. С. 207 – 215.

2. 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.
3. Zhu Y., Newell R.E. Atmospheric rivers and bombs // *Geophysical Research Letters*, 1994, V. 21, No. 18, P. 1999–2002.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Ермаков Д.М., Шарков Е.А., Чернушич А.П. Циркуляция скрытого тепла в атмосфере Земли: анализ 15 лет радиотепловых спутниковых измерений // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2017. Т. 14. № 6. С. 9-27.
9. Palmén E., Newton C.W. *Atmospheric circulation systems: Their structural and physical interpretation*. New York: Academic Press, 1969. 602 P.