

Сравнительный анализ оценок горизонтальных потоков водяного пара по данным SSMIS и реанализа ERA5

Я.О. Бахрамхан, Д.М. Ермаков, Е.В. Пашинов, С.А. Втюрин

Институт космических исследований РАН
117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32.

E-mails: yaobakhramkhan@edu.hse.ru, d.m.ermakov@cosmos.ru, pashinov@iki.rssi.ru, vtiurin@cosmos.ru

Водяной пар как один из парниковых газов играет важную роль в формировании климата Земли. Понимание того, как водяной пар участвует в переносе энергии и вещества во временном и пространственном масштабе необходимо для оценки водных ресурсов и прогноза опасных метеорологических явлений. Наиболее полные оценки состояния и динамики атмосферы содержатся в данных реанализа. Однако расхождения оценок в разных схемах реанализа свидетельствуют о наличии проблем, заключающихся в несовершенстве параметризации физических процессов, описания подстилающей поверхности в численных моделях, а также в ошибках многообразных усваиваемых данных. Кроме того, расчеты в схемах реанализа ресурсоемки и не всегда пригодны для применения в практических (в частности, оперативных) задачах дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В ИКИ РАН развивается подход спутникового радиотепловидения, позволяющий восстанавливать динамические характеристики атмосферы (в частности, горизонтальные потоки водяного пара) непосредственно на основе данных спутниковых наблюдений микроволновыми радиометрами. В настоящей работе проведено сравнение горизонтальных потоков водяного пара на основе реанализа ERA5 и продукта спутникового радиотепловидения по данным SSMIS. Сравнение охватывает все точки наблюдений приборами SSMIS за 2013-2020 годы. В результате получены карты средних невязок зональных и меридиональных компонент вертикально интегрированных горизонтальных потоков водяного пара по спутниковым данным и реанализу, среднеквадратичный разброс этих невязок (СКО), а также коэффициент корреляции между потоками по ERA5 и SSMIS.

Ключевые слова: потоки водяного пара, спутниковое радиотепловидение, зональная/меридиональная компоненты переноса, ERA5, SSMIS.

Comparative analysis of horizontal water vapor flux estimates based on SSMIS and ERA5 reanalysis data

Ya.O. Bakhramkhan, D.M. Ermakov, E.V. Pashinov, S.A. Vturin

Space Research Institute RAS

Water vapor, as a greenhouse gas, plays a vital role in shaping the Earth's climate. Understanding how water vapor participates in energy and matter transfer over time and space is essential for assessing water resources and forecasting hazardous meteorological events. Reanalysis data provides the most comprehensive assessments of the state and dynamics of the atmosphere. However, discrepancies in estimates across reanalysis schemes indicate problems related to imperfect parameterization of physical processes, inadequate description of the underlying surface in numerical models, and errors in the diverse data being assimilated. Furthermore, reanalysis calculations are resource-intensive and not always suitable for practical (particularly operational) applications in Earth remote sensing (ERS). The Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences is developing a satellite radiothermvision approach that allows for the reconstruction of atmospheric dynamic characteristics (in particular, horizontal water vapor fluxes) directly from satellite observations by microwave radiometers. This paper compares horizontal water vapor fluxes based on ERA5 reanalysis and satellite

radiothermovation data from SSMIS. The comparison covers all SSMIS observation points for 2013–2020. This study yielded maps of the mean residuals of the zonal and meridional components of vertically integrated horizontal water vapor fluxes from satellite data and reanalysis, the root-mean-square (RMS) spread of these residuals, and the correlation coefficient between the ERA5 and SSMIS fluxes.

Keywords: water vapor fluxes, satellite radiothermovation, zonal/meridional transport components, ERA5, SSMIS.

Введение

Водяной пар – один из газов земной атмосферы, который оказывает значительное влияние на климат планеты. В частности, он усиливает парниковый эффект из-за увеличения влагосодержания атмосферы при продолжающемся росте температуры воздуха [5; 9]. Водяной пар вовлекается в ветровые потоки, в результате чего происходит перенос вещества и энергии, который, в свою очередь, влияет на водный баланс территорий [4; 2; 3; 8] и на частоту возникновения опасных метеорологических явлений.

Наиболее полные оценки потоков водяного пара можно получить из реанализа, в частности из реанализа ERA5 [1]. Реанализ совмещает численное моделирование на основе физических законов и данные наблюдений для получения физически обоснованных и полных оценок состояния атмосферы. Продукты реанализа имеют большой временной и пространственный охват по сравнению с разреженной сетью метеорологических наблюдений, они заполняют пробелы в тех областях Земли, где наблюдается недостаток данных [10; 6]. Все это делает оценки реанализа одним из самых важных продуктов для прогнозирования погоды и климатических изменений, а также для анализа потоков водяного пара [12; 7; 13]. Однако реанализ имеет свои недостатки, которые обусловлены как ошибками в усваиваемых данных разнообразных наблюдений, так и несовершенством параметризации физических процессов и описания подстилающей поверхности в численных моделях [11]. Кроме того, расчеты в схемах реанализа ресурсоемки и не всегда пригодны для применения в практических (в частности, оперативных) задачах дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

В ИКИ РАН развивается подход спутникового радиотепловидения, позволяющий восстанавливать динамические характеристики атмосферы (в частности, горизонтальные потоки водяного пара) непосредственно на основе данных спутниковых наблюдений микроволновыми радиометрами. В настоящей работе проведено сравнение горизонтальных потоков водяного пара на основе реанализа ERA5 и продукта спутникового радиотепловидения по данным SSMIS. Сравнение охватывает все точки наблюдений приборами SSMIS за 2013–2020 годы. В результате получены карты средних невязок зональных и меридиональных компонент вертикально интегрированных горизонтальных потоков водяного пара по спутниковым данным и реанализу, среднеквадратичный разброс этих невязок (СКО), а также коэффициент корреляции между потоками по ERA5 и SSMIS.

Предварительная обработка данных потоков водяного пара

Для анализа согласованности данных проведена предварительная обработка реанализа ERA5 и продукта спутникового радиотепловидения по данным SSMIS. Основная характеристика наборов приведена в таблице 1. Данные хранятся в формате файлов NetCDF, причем в одном файле находятся данные на 1 месяц. Данные охватывают период с 2013 по 2020 годы и покрывают всю Землю. Предварительная обработка включала приведение наборов к единому временному формату, а также поиск, обработку выбросов, построение синхронных рядов данных на единой координатной сетке.

Таблица 1. Характеристика наборов данных о потоках водяного пара

Набор данных	ERA5	SSMIS
Переменные	ИВА* Зональный поток пара Меридиональный поток пара	ИВА* Зональная компонента верта Меридиональная компонента ветра
Долгота левого края сетки	0°	20° в. д.
Периодичность данных	1 час	3 часа
Пространственное разрешение	~0,25 градуса	~0,25 градуса

* Интегральное влагосодержание атмосферы

Так как граничные долготы у ERA5 и SSMIS отличаются, для временных срезов ERA5 проведено циклическое смещение, в результате которой граничная долгота установилась на 20° восточной долготы.

Данные ERA5 по всей координатной сетке привязаны к единому моменту всемирного времени, т.е. отражают «мгновенное» состояние атмосферы. Шаг обновления по времени для всей последовательности данных составляет строго 1 час. Продукт спутникового радиотепловидения представляет собой развертку по времени на координатной сетке, данные в каждом узле соответствуют некоторому моменту местного времени с точностью до полупериода обращения спутника (менее часа). Шаг обновления данных по времени составляет три часа. Таким образом, для корректного сопоставления необходимо предварительно синхронизировать ряды данных в каждом узле координатной сетки.

В исследовании было решено принять за основу продукты спутникового радиотепловидения и строить максимально близкие к ним данные реанализа по соответствующим величинам. Поскольку расчеты в обоих случаях выполнялись на совпадающих координатных сетках необходимо было для каждого узла сетки подобрать максимально близкие по времени пары данных. С этой целью для каждого значения исследуемой переменной из продукта спутникового радиотепловидения вычислялась дата и время суток ее получения по UTC с использованием содержащихся в файлах данных временных меток (число секунд, прошедших от полуночи 01.01.2003). Время округлялось до ближайшего целого часа и осуществлялся поиск файла данных реанализа за соответствующую дату и час. Из этого файла извлекалось значение, соответствующее координатам выбранного узла. Процедура повторялась по всем узлам координатной сетки и по всей последовательности данных с 2013 по 2020 годы с шагом в три часа.

Для оптимизации расчетов при переходе от местного времени к UTC использовались специальные карты индекса даты и времени, ускоряющие поиск файлов реанализа, соответствующих спутниковым данным для разных областей Земли. В результате были получены синхронизированные многолетние ряды данных необходимых характеристик по ERA5 и SSMIS для каждого узла глобальной расчетной сетки. Временное расхождение между соответствующими значениями в парах по построению не превышала 30 минут.

В сравнительном анализе были рассмотрены следующие характеристики. Для тестирования и отладки алгоритма совмещения был проведен сравнительный анализ полей интегрального влагосодержания атмосферы (ИВА) в кг/м². Анализ подтвердил высокую степень согласия полей ИВА по SSMIS и ERA5. Ключевую часть исследования составлял сравнительный анализ полей зональной и меридиональной компонент вертикально интегрированных горизонтальных потоков водяного пара, а также

соответствующих эффективных скоростей переноса. В ERA5 данные о вертикально интегрированных горизонтальных потоках в $\text{кг}/(\text{м}\times\text{с})$ содержатся непосредственно, а для расчета соответствующих эффективных скоростей в $\text{м}/\text{с}$ производилось деление величин потоков на синхронные значения ИБА по ERA5. В продуктах спутникового радиотепловидения напротив содержатся расчетные значения эффективных скоростей переноса водяного пара в $\text{м}/\text{с}$, а для получения значений потоков в $\text{кг}/(\text{м}\times\text{с})$ эффективные скорости умножались на соответствующие значения ИБА по SSMIS.

Методика анализа данных потоков водяного пара

Для сравнительного анализа рядов зональных и меридиональных потоков водяного пара и скоростей его переноса выбраны три статистических показателя: средняя невязка, СКО средней невязки и коэффициент корреляции Пирсона. Средняя невязка показывает меру систематического смещения одного ряда данных относительно другого. СКО служит мерой амплитуды изменения невязки даже при отсутствии систематического смещения. Таким образом, при наилучшем соответствии двух рядов данных значения обеих метрик становятся равными нулю. Однако отличие СКО от нуля может соответствовать разным сценариям взаимного поведения двух рядов данных, которые можно различить с использованием коэффициента корреляции. Коэффициент корреляции показывает меру линейной связи между оценками потоков пара из двух источников. В наилучшем случае он равен единице, что свидетельствует о полном подобии временного хода двух переменных: при росте значений одного ряда происходит пропорциональный рост значений другого ряда и наоборот, т.е. данные меняются синфазно. Эти изменения могут происходить с разными амплитудами, что покажет отличие от нуля значений СКО и/или относительно разных средних уровней, что покажет средняя невязка. Однако, при близком к единице коэффициенте корреляции можно ввести линейную поправку в один из рядов данных, чтобы минимизировать невязку и ее СКО и привести значения обоих рядов к единой шкале. Необходимость такой дополнительной калибровки может возникнуть в силу ряда причин, например, неравномерной чувствительности алгоритмов спутникового радиотепловидения к переносу водяного пара на разных высотах [7].

Предварительные результаты и выводы

Анализ предварительных результатов показывает выраженную пространственную неоднородность взаимного соответствия пространственных рядов данных. В наименьшей степени это проявляется в значениях средней невязки (оценки потоков по реанализу ERA5 и спутниковому радиотепловидению можно считать несмещенными). СКО невязок горизонтальных потоков в среднем выше для зональных компонент, что ожидаемо в связи с большими абсолютными величинами этих компонент. Однако в ряде случаев экстремумы достигаются для меридиональных компонент переноса над южным океаном, что требует дополнительной проверки. Коэффициенты корреляции принимают наибольшие значения (около 0,8) для потоков над океаном (рис. 1). Следует отметить, что нередко резкое снижение корреляции оказывается обусловлено случайным выбросом в расчетах по спутниковому радиотепловидению, вызванным пропуском или дефектами в исходных данных наблюдений. Сбор статистики по таким данным с целью их дальнейшей отбраковки или сглаживания также осуществляется в рамках этой работы.

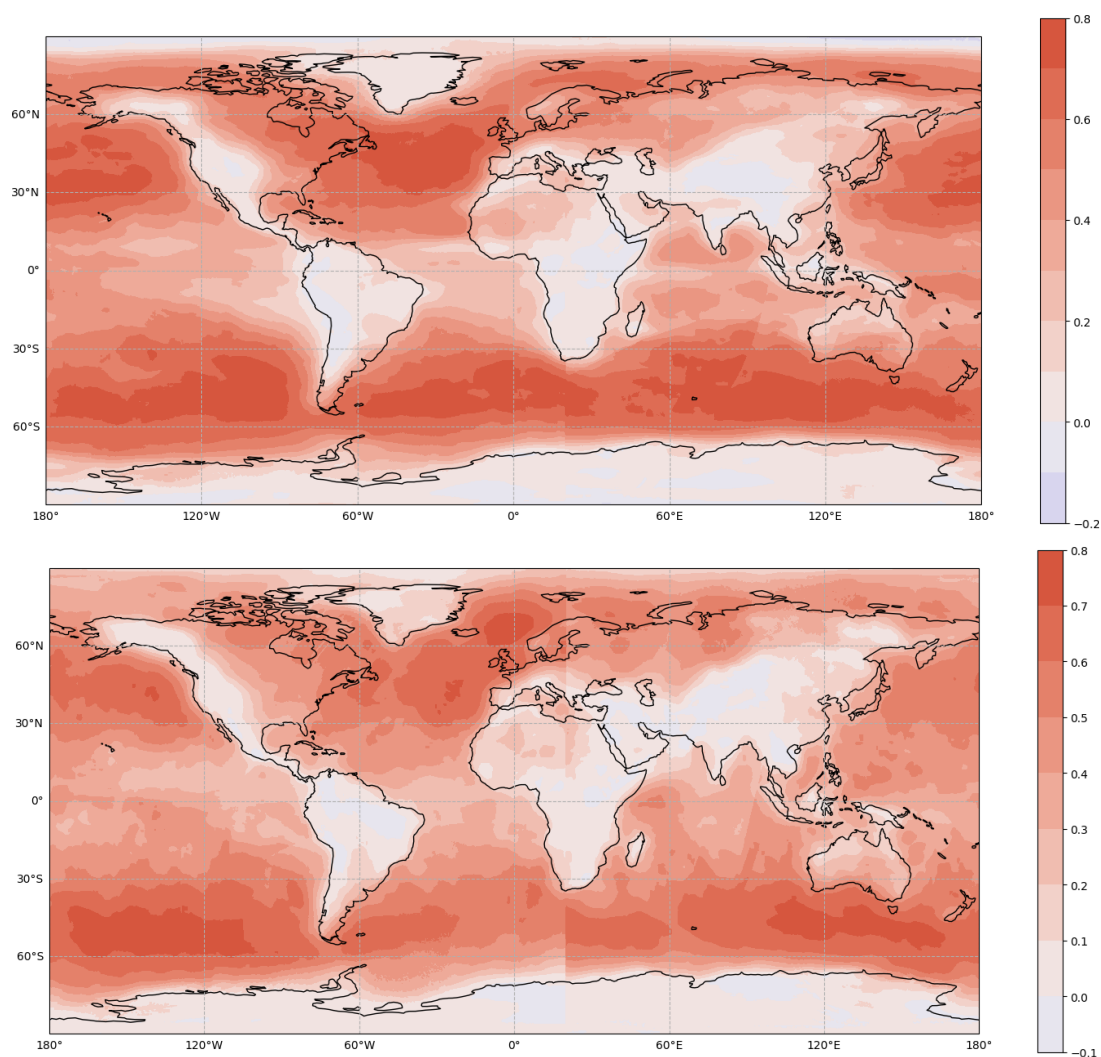


Рис. 1. Корреляция потоков водяного пара по SSMIS и ERA5 за 2013-2020 гг.: сверху – зональные потоки, внизу – меридиональные потоки

Над сушей корреляция падает, как правило, до значений 0,6 и ниже. Это также является ожидаемым результатом, поскольку над сушей менее надежны как оценки ИВА, так и скорости его переноса (в том числе, вследствие влияния орографии). Тем не менее, в ряде обширных регионов, например, почти над всей территорией России, значение корреляции составило около 0,6. При этом, корреляция существенно снижается над пустынными территориями сопредельных с Россией стран, что, видимо, обусловлено низкими величинами потока и/или слабо меняющимися полями ИВА, что приводит к неуверенному восстановлению направления переноса. Так, над пустынными территориями Среднеазиатских республик корреляция потоков по ERA5 и SSMIS падает практически до 0. При этом средние значения невязки и ее СКО также остаются низкими вследствие малых абсолютных величин потоков. Значимые отрицательные значения корреляции практически не наблюдаются.

Все приведенные выше результаты можно распространить и на случай эффективных скоростей переноса, поскольку, как было указано ранее, они получаются делением величин потоков на величины ИВА, а последние практически тождественно совпадают в данных реанализа и спутникового радиотепловидения. Более подробно полученные результаты обсуждаются и иллюстрируются в докладе.

Таким образом, в результате работы создан алгоритм предварительного пространственно-временного совмещения данных реанализа ERA5 и спутникового

радиотепловидения для сопоставления глобально рассчитанных меридиональных и зональных вертикально интегрированных потоков водяного пара и соответствующих скоростей его переноса на интервале наблюдения с 2013 по 2020 годы с детализацией по времени 3 часа. Предложены статистические метрики и реализована программная схема сопоставления рядов данных. Получены первые результаты анализа сопоставления этих рядов, которые в дальнейшем будут положены в основу рекомендаций использования соответствующих продуктов спутникового радиотепловидения для решения различных практических задач ДЗЗ. Следует отметить, что полученные оценки взаимного соответствия рассмотренных рядов данных могут претерпевать определенную коррекцию в связи с постоянным совершенствованием подходов к обработке спутниковых данных. Поэтому созданное в работе программное обеспечение может быть использовано, в том числе, в качестве инструмента автоматизации для проверки и тестирования новых версий алгоритмов спутникового радиотепловидения.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИКИ РАН (тема «Эмиссия», госрегистрация № 125111112878-8).

Литература

1. Hersbach, H. The ERA5 global reanalysis // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2020. Vol. 146. № 730. – P. 1999-2049.
2. Allan, R. P. Physically consistent responses of the global atmospheric hydrological cycle in models and observations // Surveys in Geophysics. 2014. Vol. 35. № 3. – P. 533-552.
3. Allan, R. P. The role of water vapour in Earth's energy flows / R.P. Allan – Text : direct // Surveys in geophysics. 2012. Vol. 33. № 3. – P. 557-564.
4. Bengtsson, L. The global atmospheric water cycle / L. Bengtsson – Text : direct // Environmental Research Letters. 2010. Vol. 5. № 2. Art. 025202.
5. Charlesworth, E. Stratospheric water vapor affecting atmospheric circulation // Nature Communications. 2023. Vol. 14. № 1. Art. 3925.
6. Dee, D. Toward a consistent reanalysis of the climate system // Bulletin of the American Meteorological Society. 2014. Vol. 95. № 8. – P. 1235-1248.
7. Ermakov, D. Comparison of vertically integrated fluxes of atmospheric water vapor according to satellite radiothermvision, radiosondes, and reanalysis // Remote Sensing. 2021. Vol. 13. № 9. Art. 1639.
8. Gimeno, L. The residence time of water vapour in the atmosphere // Nature Reviews Earth & Environment. 2021. Vol. 2. № 8. – P. 558-569.
9. Held, I. M. Water vapor feedback and global warming / I.M. Held, B.J. Soden – Text : direct // Annual review of energy and the environment. 2000. Vol. 25. № 1. – P. 441-475.
10. Kaiser-Weiss, A. K. Added value of regional reanalyses for climatological applications // Environmental Research Communications. 2019. Vol. 1. № 7. Art. 071004.
11. Padua, V. M. N. de. Toward the reliable use of reanalysis data as a reference for bias correction in climate models: A multivariate perspective / V.M.N. de Padua, K.-H. Ahn – Text : direct // Journal of Hydrology. 2024. Vol. 644. Art. 132102.
12. Trent, T. Evaluation of total column water vapour products from satellite observations and reanalyses within the GEWEX Water Vapor Assessment // Atmospheric Chemistry and Physics. 2024. Vol. 24. № 16. – P. 9667-9695.
13. Wang, S. Evaluation of precipitable water vapor from five reanalysis products with ground-based GNSS observations // Remote Sensing. 2020. Vol. 12. № 11. Art. 1817.