

Исследование летнего индийского муссона в поле интегрального влагосодержания атмосферы по данным спутниковых микроволновых радиометров

А. В. Кузьмин¹, Д. М. Ермаков^{1,2}, Е. Д. Суровяткина¹,
Е. В. Пашинов¹, С. А. Втюрин¹

¹ *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*
E-mail: kuzmin@cosmos.ru

² *Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники*
им. В. А. Котельникова РАН, Фрязино, 141120, Московская обл., Россия
E-mail: dima@ire.rssi.ru

По микроволновым спутниковым данным SSMIS (*англ.* Special Sensor Microwave Imager/Sounder) F16–F18 с применением методики спутникового радиотепловидения были получены ежедневные поля интегрального влагосодержания атмосферы (ИВА) за период с 2012 по 2021 г. как над поверхностью Мирового океана, так и над сушей. Использование метода спутникового радиотепловидения позволило получить полные суточные поля ИВА, убрав лакуны с пропусками данных. Из базы данных полей ИВА для исследования характеристик летнего муссона близ п-ова Индостан были проанализированы фрагменты для двух районов: в Бенгальском зал. и Аравийском море. Выявлена зона максимального содержания водяного пара над северной частью Бенгальского зал. (с центром в точке 20° с. ш., 87,5° в. д.), которая играет ключевую роль в организации муссона над центральными и северо-восточными регионами Индии. В этом районе происходит относительно плавное возрастание ИВА со средним трендом +0,33 кг/м² в сутки с начала марта, и с началом муссона ИВА выходит на постоянную величину со средним значением за 2012–2021 гг. 62,2 кг/м². Снижение величины ИВА от среднего значения характеризует окончание периода муссона. В Аравийском море была выявлена зона, в которой наблюдается два пика содержания водяного пара: в период начала муссона и перед завершением летнего муссона в Индии, что объясняется её удалённостью от побережья и реверсивным движением внутритропической зоны конвергенции (ВЗК) через Аравийское море. Наблюдение в этой зоне может быть полезным для мониторинга образования сильных циклонов в период прохождения через неё ВЗК.

Ключевые слова: глобальные поля интегрального влагосодержания атмосферы, летний индийский муссон, микроволновая радиометрия, спутниковое радиотепловидение

Одобрена к печати: 03.05.2024
DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-292-306

Введение

Исследование роли парниковых газов в изменении климата Земли в широком диапазоне пространственно-временных масштабов, несомненно, представляет собой фундаментальную научную проблему, которая имеет важные социальные, гуманитарные и экономические аспекты. В последние десятилетия по мере создания чувствительных радиотепловых комплексов микроволнового зондирования, способных функционировать на космических аппаратах в течение десятков лет (например, миссия DMSF (*англ.* Defense Meteorological Satellite Program)), появилась возможность глобально и на регулярной основе исследовать по спутниковым данным поля интегральных по высоте геофизических характеристик тропосферы, а также рассчитывать динамику этих полей в терминах скоростей адвекции (Ермаков, 2018; Ермаков, 2021). Особый интерес представляет пространственно-временное распределение интегрального влагосодержания атмосферы (ИВА) над тропиками, в частности, над областями Индийского океана и п-ова Индостан в зоне тропических муссонов, где наблюдается максимальное содержание интегрального водяного пара.

Муссонами называют устойчивые сезонные ветры. В Северном полушарии летом эти ветры дуют с моря на сушу и приносят дожди, а зимой происходит резкая смена направления

ветра на противоположное, что вызывает сухую погоду на суше. Разворот муссонных ветров возникает благодаря сезонному смещению внутритропической зоны конвергенции (ВЗК). Существование ВЗК обусловлено сближением пассатов — ветров в тропиках, которые движутся преимущественно с востока и притягиваются к экватору. Воздушные потоки северо-восточных пассатов из Северного полушария и юго-восточных ветров из Южного полушария сходятся в области низкого давления, где формируются мощные конвективные потоки, образуя зону межтропической конвергенции. Обычно ВЗК наблюдается как полоса облаков, приводящих к сильным осадкам и грозам, которая окружает земной шар вблизи экватора. Положение ВЗК меняется в зависимости от сезона, поскольку она следует за максимумом солнечной радиации; она движется на север в летний сезон Северного полушария и на юг — в зимний. Таким образом, ВЗК отвечает за влажные и засушливые сезоны в тропиках.

Явление летнего индийского муссона как климатического маятника значительно определяет уклад жизни населения п-ова Индостан, которое приближается к численности около двух миллиардов. Сезон летнего муссона продолжается в течение четырёх месяцев и приносит на полуостров 80 % годового количества осадков (Bollasina, 2014). Муссонные дожди существенно влияют на всю инфраструктуру сельского хозяйства и связанных с ним отраслей Индии и других близлежащих стран. Для лиц, связанных с производством сельскохозяйственной продукции, критически важно знать заранее сроки начала и конца муссонного периода, а также количество осадков. Задержка или раннее начало муссонного периода для данной местности приводит к колоссальным убыткам. При этом метеорологический департамент Индии предоставляет прогноз муссона за 14 дней только штату Керала, расположенному на южной оконечности Индостана, тогда как для остальных 27 штатов приход муссона не прогнозируется. Кроме того, метеорологический департамент Индии прогнозирует среднее по всей стране количество осадков за весь сезон дождей, что не очень помогает фермерам, живущим в разнообразных климатических зонах Индии — от субэкваториального и тропического климата на юге до умеренного и альпийского на горном севере.

Возможное решение проблемы прогноза начала и завершения муссона было предложено в работе (Stolbova et al., 2016), разработанная методология показала успех прогнозирования начала муссона в Центральной Индии за 40 дней и завершения — за 70 дней как ретроспективно (1951–2015), так и в перспективе (2016–2023) (Ludescher et al., 2021). Кроме того, в исследовании (Fan et al., 2022) был предложен новый подход, основанный на теории графов, для прогнозирования количества муссонных осадков в четырёх регионах Индии, что, безусловно, стало шагом вперёд. Однако такой эмпирический подход не объясняет физической природы разнообразия количества осадков по регионам. Именно по этой причине проводятся многочисленные исследования муссонов с помощью различных средств дистанционного зондирования с целью изучения интегрального содержания водяного пара в широком диапазоне пространственно-временных масштабов.

В связи с этим были рассмотрены возможности восстановления полей интегрального влагосодержания атмосферы как над океаном, так и над сушей. В результате анализа были выявлены два описанных ниже района вблизи п-ова Индостан: в Аравийском море и Бенгальском зал. Данные по ним (как и по другим отобраным районам) проанализированы в интервале с 2012 по 2021 г. Исследован временной ход полного содержания водяного пара над выбранными районами и показана связь характерных особенностей этого временного хода с началом и окончанием периода Индийского муссона. На крупномасштабном уровне указанная связь обусловлена генезисом муссонных явлений под влиянием сезонного смещения внутритропической зоны конвергенции к высоким широтам в совокупности с региональными орографическими особенностями.

Восстановление интегрального влагосодержания над океаном и сушей по данным спутникового радиотеплового зондирования

Для мониторинга полей атмосферных параметров из космоса традиционно применяются многоканальные сверхвысокочастотные (СВЧ) спектрометры-поляриметры (Куруза и др.,

2016; Шарков, 2014). При этом задачу восстановления полей интегрального влагосодержания атмосферы над океаном на фундаментальном уровне можно считать успешно решённой (например, в работе (Wentz, 1997)). Точность получаемых значений удовлетворяет критериям, предъявляемым большинством практических приложений, а основные потребности текущего этапа развития заключаются в улучшении пространственно-временной детальности наблюдений. Это обусловлено, прежде всего, тем обстоятельством, что свойства подстилающей поверхности в системе «океан — атмосфера» могут быть описаны малопараметрической моделью, включающей температуру и солёность поверхностного слоя океана, а также шероховатость поверхности, параметризованную скоростью приводного ветра (Wentz, 1997). Важно также, что в терминах этих параметров поверхность океана является достаточно однородной на масштабах пятна разрешения. Более проблематичным становится восстановление интегрального влагосодержания атмосферы над сушей.

Таблица 1. Спутниковые микроволновые радиометры и особенности их измерений

Прибор, носители	Годы работы	МВВУ	ОПВС, кг/м ²	Возможности применения
AMSR-E, Aqua (Koike et al., 2004)	2002–2012	13:30	4,94 (Du et al., 2015, 2017)	В совокупности данные AMSR-E и AMSR 2 — почти непрерывный ряд наблюдений с 2002 г. Оценка точности — косвенная, по сопоставлению с профилями влажности по данным инфракрасного (ИК) зондировщика AIRS (Divakarla et al., 2006). Основная проблема использования — функционирование в единственном экземпляре, что препятствует устранению пропусков данных в рамках принятой методики
AMSR 2, GCOM-W1 (Imaoka et al., 2012)	2012–2023	13:30	4,94 (Du et al., 2015, 2017)	
МТВЗА-ГЯ, «Метеор-М» (Болдырев и др., 2008)	2009 — наст. время	15:09 «Метеор-М» № 2-1 15:00 «Метеор-М» № 2-2 9:00 «Метеор-М» № 2-3	2,5 (Ермаков и др., 2021) <4,5 (Филей и др., 2022)	Несмотря на возможность использования данных в различных приложениях (Крамчанинова, Успенский, 2012; Митник и др., 2012; Пашинов, 2018; Сазонов, 2022, 2023; Чернявский и др., 2018) существуют не до конца решённые проблемы геопривязки и калибровки (Ермаков и др., 2021; Садовский, Сазонов, 2022, 2023). Кроме того, приборы в основном функционируют на орбите в единичных экземплярах
SSM/I, DMSP (Hollinger, 1988)	1987–2020	14:50 DMSP F15	10,0 (Ермаков и др., 2020)	Приборы функционировали серийно, до 3–4 экземпляров на орбите одновременно. Основная проблема — ограниченный набор каналов (только горизонтальная поляризация на частоте 22,235 ГГц; отсутствие каналов выше 90 ГГц), что препятствует надёжному восстановлению ИВА над сушей
SSMIS, DMSP (Kunkee et al., 2008)	2003 — наст. время	16:27 DMSP F16 18:35 DMSP F17 16:30 DMSP F18	3,0 (Ермаков и др., 2023)	Приборы функционируют серийно, в настоящее время три одновременно (на DMSP F16, F17, F18). Данные измерений наиболее пригодны для решения поставленной задачи

Примечание: МВВУ — местное время восходящего узла, ОПВС — оценка погрешности восстановления ИВА над сушей как оценка сверху общей погрешности восстановления ИВА, AMSR-E — *англ.* Advanced Microwave Scanning Radiometer for Earth Observing System, GCOM-W1 — *англ.* Global Change Observation Mission-Water, AIRS — *англ.* Atmospheric Infrared Sounder, МТВЗА-ГЯ — микроволновый сканер температурно-влажностного зондирования атмосферы, ГЯ — в память о Геннадии Яковлевиче Гуськове (1918–2002), SSM/I — *англ.* Special Sensor Microwave/Imager, DMSP — *англ.* Defense Meteorological Satellite Program, SSMIS — *англ.* Special Sensor Microwave Imager/Sounder.

Следует отметить, что применённая в работе технология расчёта атмосферной динамики требует регулярности глобальных наблюдений, обеспечиваемой измерениями с солнечно-синхронных орбит, что автоматически исключает из рассмотрения данные некоторых спутниковых СВЧ-радиометров.

Особенности рассмотренных в работе серий микроволновых радиометрических комплексов и применимость их измерений для решения поставленной задачи резюмированы в табл. 1.

Отметим в добавление к табл. 1 индийско-французскую миссию Megha-Tropiques, запущенную в 2011 г. и предназначенную для изучения муссонов, с комплексами радиометров MADRAS (*англ.* Microwave Analysis and Detection of Rain and Atmospheric Structures) космического сканирования и SAPHIR (*англ.* Sounder for Atmospheric Profiling of Humidity in the Intertropics by Radiometry) поперечного сканирования для зондирования профиля влажности атмосферы вблизи линии 183 ГГц. Особенностью этой миссии является наклонение орбиты 20° (Sivira et al., 2015), что позволяет наблюдать только экваториальную область. К сожалению, MADRAS проработал всего несколько месяцев, тогда как SAPHIR закончил свою работу в 2022 г.

Таким образом, представляется наиболее перспективным для решения поставленной задачи использование данных серии приборов SSMIS. Приборы SSM/I не способны обеспечить надёжного восстановления ИВА над сушей (хотя могут быть использованы для частичного заполнения пропусков данных над океаном). Приборы серии МТВЗА-ГЯ, несмотря на их перспективность, в настоящее время не обеспечивают возможности получения длинных однородных рядов глобальных наблюдений. Приборы серии AMSR до настоящего времени функционировали на орбите в единичных экземплярах, что не позволяет построить регулярные глобальные поля ИВА без пропусков на основе их измерений. Использовать их данные как дополнение к данным SSMIS также методически непросто, поскольку измерения AMSR и SSMIS, как правило, осуществляются в разные моменты местного времени.

Данные и район исследований

Одна из проблем непосредственного использования данных SSMIS для анализа интегрального водяного пара заключается в наличии 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. Принципиальная возможность восстановления интегральных по высоте атмосферы адвективных потоков водяного пара по данным спутникового радиотеплового мониторинга продемонстрирована в рамках подхода спутникового радиотепловидения (Ермаков, 2021). Суть методики состоит 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). В своей основе этот подход содержит следующие основные элементы:

- 1) восстановление полей ИВА по данным радиометрических измерений разных спутников;
- 2) нанесение полей ИВА на регулярную прямоугольную сетку координат;
- 3) устранение пропуска данных путём совмещения близких по времени полей ИВА — получение опорных полей ИВА;
- 4) временная интерполяция опорных полей;
- 5) вычисление векторов смещения между опорными или интерполированными полями и пересчёт их в векторы адвекции водяного пара.

Наложение полей ИВА на регулярную сетку координат $0,25 \times 0,25^\circ$ 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 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 ч. За основные поля были взяты данные ИВА со спутника F16, затем пропуски в них были закрыты данными F18 и F17. После этого остаются незначительные лакуны, которые устраняются специальной интерполяционной процедурой (Ермаков, 2018). Пример устранения пропуска данных приведён на *рис. 1*.

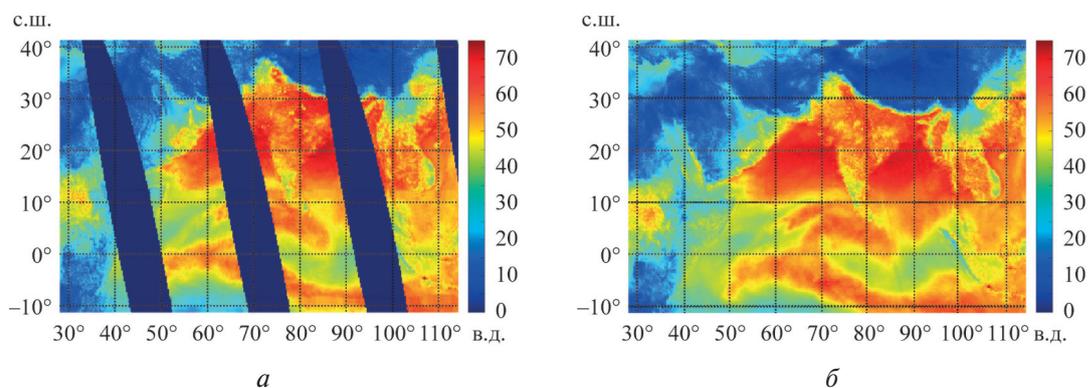


Рис. 1. Изображение ИВА, полученное по радиометрическим данным: глобальное поле ИВА, полученное 30.06.2012 по данным SSMIS F16 (*а*) и в тот же день после закрытия пропусков данных (*б*). Цветовая шкала дана в $\text{кг}/\text{м}^2$

Поля, аналогичные изображению *рис. 1б*, могут быть получены два раза в сутки с промежутком 12 ч. Они становятся опорными для следующих ступеней алгоритма. Далее вычисляется оптический поток между опорными полями и затем смещения элементов изображения. При этом выполняется временная интерполяция опорных полей с 12 до 3 ч. Получающиеся при этом поля векторов смещения элементов изображения можно пересчитать в векторы адвекции умножением вектора на величину ИВА.

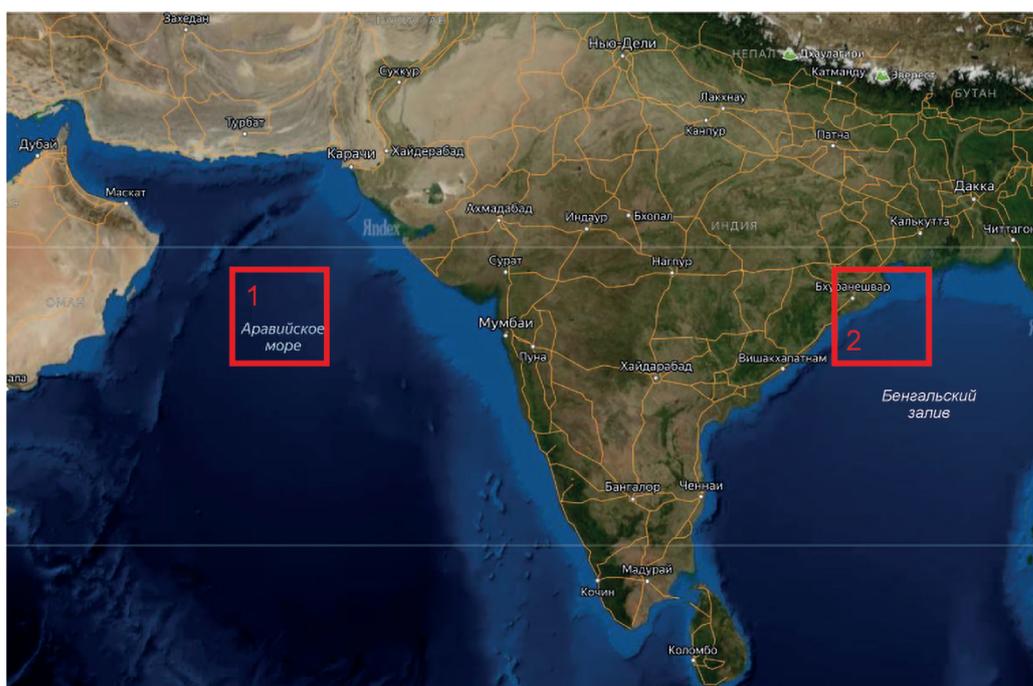


Рис. 2. Районы анализа полей водяного пара в Аравийском море: 1 — квадрат $3 \times 3^\circ$ с центром в точке 20° с. ш., $64,5^\circ$ в. д.) и в Бенгальском зал.: 2 — квадрат $3 \times 3^\circ$ с центром в точке 20° с. ш., $87,5^\circ$ в. д.

Таким образом были получены ежесуточные поля ИВА за 2012–2021 гг. по радиометрическим данным TDR (*англ.* Temperature Data Record) Base (L1A) SSMIS F16–F18 каналов 1–18 с интервалом 3 ч на координатной сетке $0,25 \times 0,25^\circ$. Из этой базы данных для анализа полей водяного пара были установлены два района у берегов п-ова Индостан (*рис. 2*, см. с. 296). Район в Бенгальском зал. представляет собой квадрат $3 \times 3^\circ$ с центром в точке 20° с.ш., $87,5^\circ$ в.д., в котором установлено максимальное содержание водяного пара в северной части Бенгальского зал. Размер квадрата выбран из тех соображений, что величина, равная примерно 330×330 км, является оптимальной для анализа ИВА: меньшая величина больше отражает локальные свойства, а бóльшая — чрезмерно усредняет влияние потоков водяного пара. Вторая область такого же размера установлена для сравнения на той же широте в Аравийском море с центром в точке 20° с.ш., $64,5^\circ$ в.д. Выбор этих двух районов позволил провести анализ влияния потоков водяного пара в Аравийском море и Бенгальском зал. — в районах, которые обеспечивают приток влаги в период муссона на территорию Индостана.

На *рис. 3* представлены усреднённые значения ИВА (в $\text{кг}/\text{м}^2$) в каждом выбранном районе Аравийского моря и Бенгальского зал. в период 2012–2021 гг. На левой панели показаны данные для Аравийского моря (район 1 на *рис. 2*), а на правой — данные для Бенгальского зал. (район 2). Вертикальные розовые линии обозначают даты начало периода муссона, вертикальные голубые линии (при наличии) — даты конца муссона в Центральной Индии (Surovyatkina, 2023) в точке (20° с.ш., 80° в.д.), которые были получены по данным работ (Stolbova et al., 2016) и (Ludescher et al., 2021), в период 2016–2021 гг. Как видно из полученных данных, изменчивость дат начала и завершения муссона варьируется в течение месяца, что подтверждается ретроспективно за период 1951–2015 (Stolbova et al., 2016; Turner, Annamalai et al., 2012; Zhang et al., 2022).

Таким образом, в результате анализа данных были выявлены два региона с экстремальным содержанием водяного пара по обе стороны п-ова Индостан: в Бенгальском зал. и в Аравийском море.

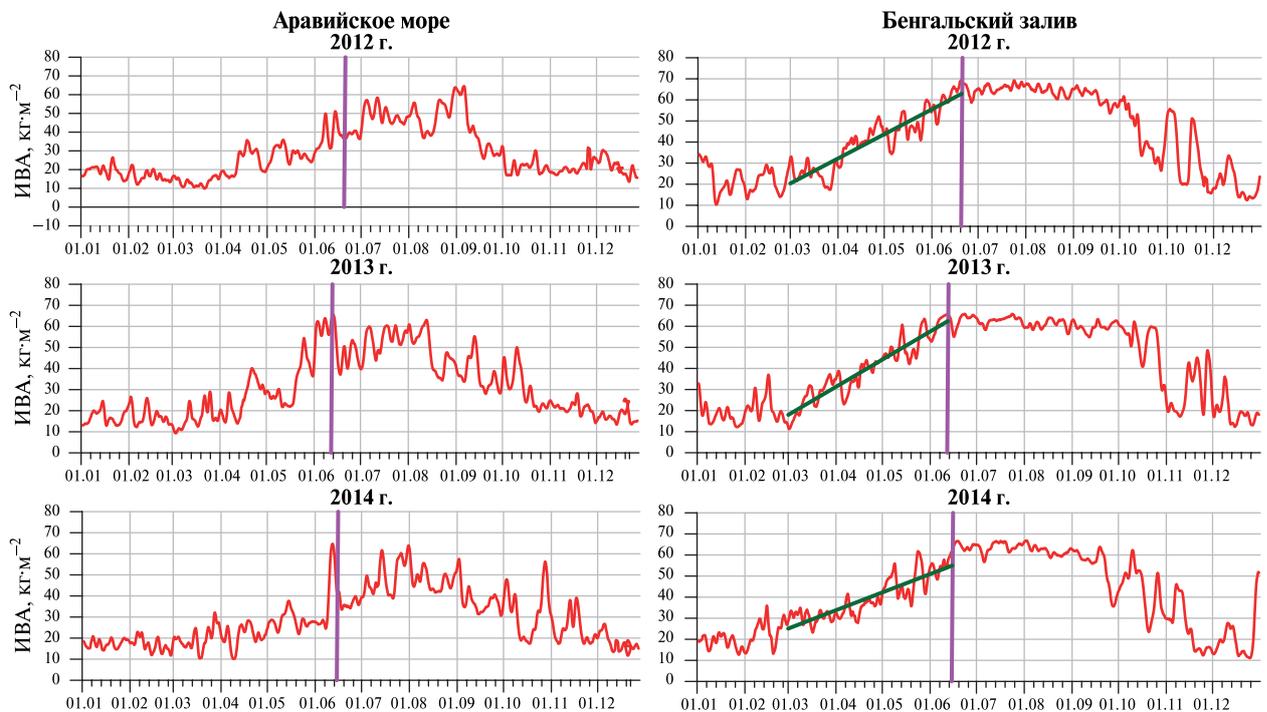


Рис. 3. Временной ход усреднённых значений ИВА по районам Аравийского моря (*слева*) и Бенгальского зал. (*справа*) в период 2012–2014 гг. Вертикальные розовые линии обозначают начало периода муссона, вертикальные голубые линии — конец муссона. Зелёные сплошные линии показывают линейный тренд возрастания ИВА в районе Бенгальского зал. с 1 марта текущего года до момента начала муссона (*окончание см. на с. 298*)

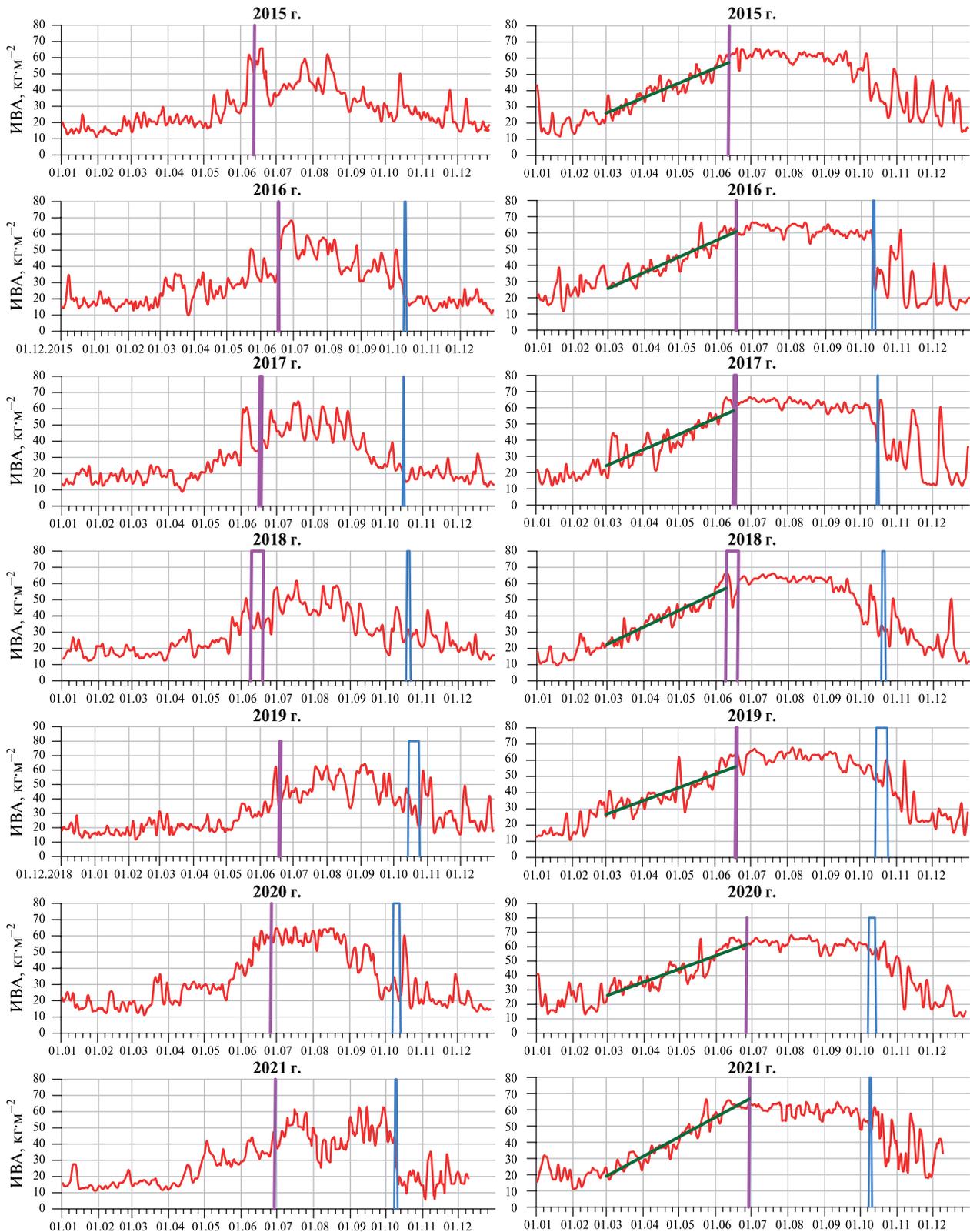


Рис. 3. Временной ход усреднённых значений ИВА по районам Аравийского моря (слева) и Бенгальского зал. (справа) в период 2014–2021 гг. Вертикальные розовые линии обозначают начало периода муссона, вертикальные голубые линии — конец муссона. Зелёные сплошные линии показывают линейный тренд возрастания ИВА в районе Бенгальского зал. с 1 марта текущего года до момента начала муссона (начало см. на с. 297)

Над северной частью Бенгальского зал. (с центром в точке 20° с. ш., $87,5^\circ$ в. д.) выявлена зона максимального содержания водяного пара, которая играет ключевую роль в организации муссона над центральными и северо-восточными регионами Индостана. Возникновение этой зоны обусловлено расположением части внутритропической зоны конвергенции, которая устанавливается на севере Бенгальского зал. вблизи предгорья Гималаев, которые служат естественным барьером на её пути. Установление ВЗК в регионе в июне знаменует начало муссона в центральной и северо-восточной Индии и Бангладеш (Soman, Krishna Kumar, 1993). В начале октября ВЗК отступает на юг, унося с собой сезон дождей из региона.

В Аравийском море была выявлена зона (с центром в 20° с. ш., $64,5^\circ$ в. д.), в которой наблюдается два пика максимального повышения содержания водяного пара: в период начала муссона и перед завершением летнего муссона в Индии.

Разница, возникающая в обнаруженных зонах, объясняется орографией и положением ВЗК, которая в июне движется от экватора на север Индии к подножию Гималаев и остаётся там до конца муссона. При этом восточная часть ВЗК останавливается перед предгорьем Гималаев, локализуясь в северной части Бенгальского зал. в течение всего сезона муссона. Тогда как западная часть ВЗК продвигается через Аравийское море на север и затем располагается на северо-западной части Индостана у подножия Гималаев в течение всего лета, а затем продвигается обратно через Аравийское море на юг, унося с собой сезон дождей. Реверсивное движение ВЗК через Аравийское море объясняет возникновение двух максимумов содержания водяного пара в течение сезона муссона в этом районе.

Анализ данных

Начало сезона муссонов связано со сдвигом внутритропической зоны конвергенции с экватора в северные широты примерно на 20° . Значение ИВА с января до апреля находится на уровне $20\text{--}30$ кг/м² как в Аравийском море, так и в Бенгальском зал., затем к маю – июню возрастает до $30\text{--}50$ кг/м², а к началу муссонного периода доходит до 60 кг/м². Если в Аравийском море рост ИВА от года к году происходит с большими вариациями, то в Бенгальском зал. в каждом исследуемом сезоне возрастание ИВА происходит относительно плавно со средним трендом $0,33$ кг/м² в сутки (от $0,43$ кг/м² в сутки в 2013 г. до $0,27$ кг/м² в сутки в 2019 г.) и с началом муссона выходит на постоянное значение — «полку» со средним значением за все рассматриваемые годы $62,18$ кг/м².

Таблица 2. Средние годовые значения и стандартное отклонение ИВА за периоды с 15 июня до 20 сентября и с 15 июня до 10 октября над выделенным районом 2 (см. рис. 2)

Год	15 июня – 20 сентября		15 июня – 10 октября	
	Среднее	Стандартное отклонение	Среднее	Стандартное отклонение
2012	64,63	2,78	63,27	4,26
2013	61,47	2,83	61,02	3,13
2014	62,39	2,95	59,93	6,93
2015	61,48	3,53	59,81	5,85
2016	62,01	3,15	61,57	3,20
2017	62,65	2,52	62,14	2,78
2018	61,80	3,49	59,16	7,48
2019	61,87	3,91	61,03	4,22
2020	62,50	3,34	62,17	3,34
2021	61,00	4,26	59,71	5,22
Среднее:	62,18		60,98	

В табл. 2 представлены средние значения, дисперсия и стандартное отклонение ИВА над районом 2 в Бенгальском зал. за периоды с 15 июня до 20 сентября и с 15 июня до 10 октября. Рассмотрены два указанных периода, так как окончание муссона сильно варьируется от году к году. Таким образом, переход от возрастания ИВА к постоянной величине сигнализирует о начале муссонного периода.

На рис. 4 представлены данные ИВА (верхняя панель), построенные по радиометрическим измерениям в районах 1 и 2 за 2016 г. Ниже показаны взятые по данным реанализа ECMWF (англ. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) Era 5 (Hersbach et al., 2020) данные относительной влажности (средняя панель) и температуры атмосферы (нижняя панель) на горизонте 1000 гПа. Как можно видеть, относительная влажность обоих районов возрастает до 80–85 % начиная с марта и держится примерно на этом уровне до конца муссона. На графиках температуры атмосферы на уровне 1000 гПа отслеживается сезонное повышение температуры поверхности океана в этих районах, где отчётливо видны два максимума и провал между ними. Это происходит в силу того, что в тропиках солнце бывает в зените два раза в году, в те дни, когда его склонение равно географической широте места. После прохождения первого зенита температура снижается, влажность увеличивается и появляются облака — предвестники начала муссона. Поэтому температура продолжает падать до температуры муссона, введённой в работе (Stolbova et al., 2016), которая составляет около 26 °С в Аравийском море и 28 °С в Бенгальском зал. Когда температура падает ниже температуры муссона, сезон дождей прекращается.

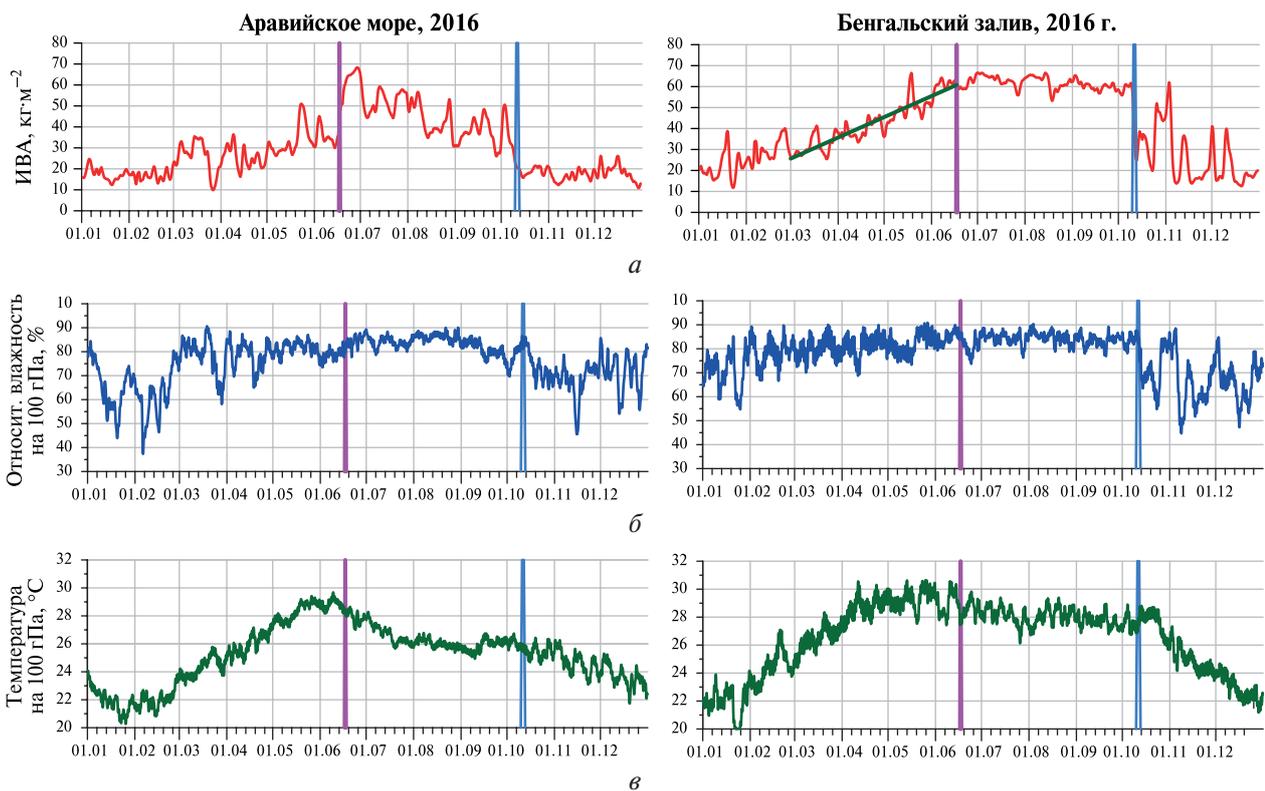


Рис. 4. Интегральная влажность ИВА (верхняя панель), построенная по радиометрическим измерениям, относительная влажность (средняя панель) и температура атмосферы (нижняя панель) на горизонте 1000 гПа, взятые по данным реанализа ECMWF Era 5 в районах 1 и 2 за 2016 г.

Снижение ИВА от постоянного уровня происходит в результате завершения периода муссона. Совершается это не так ярко выражено, как с началом муссона. Снижение ИВА характеризуется сильными различиями по годам, тем не менее это снижение определяет завершение летнего муссона, вслед за которым начинается приближение зимнего муссона.

Заключение

По микроволновым спутниковым данным TDR Base (L1A) SSMIS F16-F18 с применением методики спутникового радиотепловидения были получены ежедневные поля интегрального влагосодержания атмосферы за период с 2012 по 2021 г. как над поверхностью Мирового океана, так и над сушей. Использование метода спутникового радиотепловидения позволило получить полные суточные изображения интегрального влагосодержания атмосферы, убрав лакуны с пропусками данных. Из базы данных полей ИВА для исследования характеристик летнего Индийского муссона были проанализированы данные ИВА двух районов: в Бенгальском зал. и Аравийском море.

Выявлена зона максимального содержания водяного пара над северной частью Бенгальского зал. (с центром в точке 20° с.ш., $87,5^\circ$ в.д.). Благодаря устойчивой позиции внутритропической зоны конвергенции в этом регионе Бенгальского зал. возникает зона активности тропических циклонов в течение всего сезона муссона. В результате этой активности Центральная Индия и северо-восточные штаты Индии получают большее количество осадков по сравнению с другими регионами. Поэтому выявленная зона в северной части Бенгальского зал. играет ключевую роль в организации муссона над центральными и северо-восточными регионами Индостана. В этом районе происходит относительно плавное возрастание ИВА со средним трендом $0,33 \text{ кг/м}^2$ в сутки с начала марта и с началом муссона выходит на постоянную величину со средним значением за 2012–2021 гг. $62,18 \text{ кг/м}^2$. Снижение ИВА от среднего значения характеризует окончание периода муссона.

Благодаря юго-восточным муссонным ветрам водяной пар из северной части Бенгальского зал. перемещается на сушу — в центральную и северо-восточную часть Индостана, принося долгожданные муссонные дожди. Именно эту часть полуострова в Центральной Индии называют ядром муссона (*англ.* The Core Monsoon Zone — CMZ) (Gadgil, 2003). От количества переносимого из океана водяного пара зависит количество осадков в регионе. Поэтому мониторинг полей ИВА в этом регионе имеет большое значение для определения интенсивности осадков в области ядра муссона.

В Аравийском море была выявлена зона, в которой наблюдается два пика максимального повышения содержания водяного пара: в период начала муссона и перед завершением летнего муссона в Индии, что объясняется её удалённостью от побережья и реверсивном движением ВЗК через Аравийское море. Наблюдения в этой зоне могут быть полезными для мониторинга образования сильных циклонов в период прохождения через неё ВЗК.

Анализ полей ИВА по микроволновым данным спутниковых радиометров может служить хорошим инструментом для исследования атмосферных процессов типа летнего индийского муссона как в глобальном, так и в региональном масштабах.

Работа выполнена в рамках государственных заданий Института космических исследований РАН («Мониторинг», гос. рег. № 122042500031-8) в части тематической обработки и анализа данных, («Управление», гос. рег. № 122042500013-4) в части методологии и интерпретации результатов и Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН («Космос-2», гос. рег. № 0030-2019-0008) в части применения к обработке алгоритмов интерполяционного устранения пропусков данных.

Литература

1. Болдырев В. В., Горобец Н. Н., Ильгасов П. А., Никитин О. В., Панцов В. Ю., Прохоров Ю. Н., Стрельников Н. И., Стрельцов А. М., Черный И. В., Чернявский Г. М., Яковлев В. В. Спутниковый микроволновый сканер/зондировщик МТВЗА-ГЯ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5. Т. 1. С. 243–248.
2. Ермаков Д. М. Глобальная циркуляция скрытого тепла в атмосфере Земли по данным спутникового радиотепловидения // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 3. С. 3–28. DOI: 10.7868/S0205961418030016.

3. *Ермаков Д. М., Поляков В. Д., Полякова Е. В.* Разработка нового алгоритма восстановления интегрального влагосодержания атмосферы над сушей по данным спутникового радиотеплового мониторинга // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2020. Т. 17. № 1. С. 31–41. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-31-41.
4. *Ермаков Д. М., Кузьмин А. В., Мазуров А. А. и др.* Концепция потоковой обработки данных российских спутниковых СВЧ-радиометров серии МТВЗА на базе ЦКП «ИКИ-Мониторинг» // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2021. Т. 18. № 4. С. 298–303. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-298-303.
5. *Ермаков Д. М., Пашинов Е. В., Кузьмин А. В. и др.* Концепция расчета элементов регионального гидрологического баланса с использованием спутникового радиотепловидения // *Гидрометеорология и экология*. 2023. № 72. С. 470–492. DOI: 10.33933/2713-3001-2023-72-470-492.
6. *Крамчанинова Е. К., Успенский А. Б.* Определение приповерхностной температуры воздуха над сушей по данным микроволнового зондирования с ИСЗ «Метеор-М» № 1 // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2012. Т. 9. № 3. С. 127–136.
7. *Кутуза Б. Г., Данилычев М. В., Яковлев О. И.* Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. М.: Ленанд. 2016. 336 с.
8. *Митник Л. М., Митник М. Л., Гурвич И. А., Выкочко А. В., Кузлякина Ю. А., Черный И. В., Чернявский Г. М.* Исследование эволюции тропических циклонов в северо-западной части Тихого океана по данным СВЧ-радиометров МТВЗА-ГЯ со спутника «Метеор-М» № 1 и AMSR-E со спутника Aqua // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2012. Т. 9. № 4. С. 121–128.
9. *Пашинов Е. В.* Восстановление интегрального паросодержания атмосферы по данным прибора МТВЗА-ГЯ («Метеор-М» № 2) над поверхностью океана // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15. № 4. С. 225–235. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-225-235.
10. *Садовский И. Н., Сазонов Д. С.* Географическая привязка данных дистанционных радиометрических измерений МТВЗА-ГЯ // *Исслед. Земли из космоса*. 2022. № 6. С. 101–112. DOI: 10.31857/S0205961422060100.
11. *Садовский И. Н., Сазонов Д. С.* Корректировка географической привязки данных МТВЗА-ГЯ // *Исслед. Земли из космоса*. 2023. № 6. С. 73–85. DOI: 10.31857/S0205961423060076.
12. *Сазонов Д. С.* Алгоритм восстановления температуры поверхности океана, скорости приводного ветра и интегрального паросодержания по данным МТВЗА-ГЯ // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2022. Т. 19. № 1. С. 50–64. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-50-64.
13. *Сазонов Д. С.* Исследование возможности восстановления интенсивности осадков по измерениям МТВЗА-ГЯ // *Исслед. Земли из космоса*. 2023. № 5. С. 23–35. DOI: 10.31857/S020596142305007X. EDN: XQPADE.
14. *Филей А. А., Андреев А. И., Кучма М. О., Успенский А. Б.* Применение искусственных нейронных сетей для определения общего содержания водяного пара в атмосфере по данным микроволнового МТВЗА-ГЯ со спутника «Метеор-М» № 2-2 // *Метеорология и гидрология*. 2022. № 4. С. 34–45. DOI: 10.52002/0130-2906-2022-4-34-45.
15. *Чернявский Г. М., Митник Л. М., Кулешов В. П. и др.* Микроволновое зондирование океана, атмосферы и земных покровов по данным спутника «Метеор-М» № 2 // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15. № 4. С. 78–100. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-78-100.
16. *Шарков Е. А.* Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: физические основы: В 2 т. Т. 1. М.: ИКИ РАН, 2014. 544 с.
17. *Bollasina M. A.* Hydrology: Probing the monsoon pulse // *Nature Climate Change*. 2014. V. 4. P. 422–423. <https://doi.org/10.1038/nclimate2243>.
18. *Divakarla M. G., Barnet C. D., Goldberg M. D. et al.* Validation of Atmospheric Infrared Sounder temperature and water vapor retrievals with matched radiosonde measurements and forecasts // *J. Geophysical Research*. 2006. V. 111. Iss. D9. Article D09S15. <https://doi.org/10.1029/2005JD006116>.
19. *Du J., Kimball J. S., Jones L. A.* Satellite microwave retrieval of total precipitable water vapor and surface air temperature over land from AMSR 2 // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2015. V. 53. Iss. 5. P. 2520–2531. DOI: 10.1109/TGRS.2014.2361344.
20. *Du J., Kimball J. S., Jones L. A. et al.* A global satellite environmental data record derived from AMSR-E and AMSR2 microwave Earth observations // *Earth System Science Data*. 2017. V. 9. Iss. 2. P. 791–808. <https://doi.org/10.5194/essd-9-791-2017>.
21. *Ermakov D.* Satellite radiothermvision of atmospheric processes: method and applications. Cham: Springer, 2021. 199 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-57085-9>.

22. Fan J., Meng J., Ludescher J. et al. Network-based approach and climate change benefits for forecasting the amount of Indian monsoon rainfall // *J. Climate*. 2022. V. 35. Iss. 3. P. 1009–1020. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0063.1>.
23. Gadgil S. The Indian monsoon and its variability // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 2003. V. 31. P. 429–467. DOI: 10.1146/annurev.earth.31.100901.141251.
24. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis // *Quarterly J. Royal Meteorological Society*. 2020. V. 146. Iss. 730. P. 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.
25. Hollinger J. P. DMSP Special Sensor Microwave/Imager Calibration/Validation: Final Report. V. 1. Space Sensing Branch, Naval Research Laboratory, Washington, DC, 1988. 190 p.
26. Imaoka K., Maeda T., Kachi M. et al. Status of AMSR2 instrument on GCOM-W1 // *Proc. SPIE*. V. 8528. Earth Observing Missions and Sensors: Development, Implementation, and Characterization II. 2012. Article 852815. <https://doi.org/10.1117/12.977774>.
27. Koike T., Nakamura Y., Kaihotsu I. et al. Development of an Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR-E) algorithm of soil moisture and vegetation water content // *Proc. Hydraulic Engineering*. 2004. V. 48. P. 217–222. DOI: <https://doi.org/10.2208/prohe.48.217>.
28. Kunkin 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. V. 46. P. 863–883. DOI: 10.1109/tgrs.2008.917980.
29. Ludescher J., Martin M., Boers N. et al. Network-based forecasting of climate phenomena // *Proc. National Academy of Sciences (PNAS)*. 2021. V. 118. No. 47. Article e1922872118. <https://doi.org/10.1073/pnas.1922872118>.
30. Sivira R. G., Brogniez H., Mallet C., Oussar Y. A layer-averaged relative humidity profile retrieval for microwave observations: design and results for the Megha-Tropiques payload // *Atmospheric Measurement Techniques*. 2015. V. 8. P. 1055–1071. <https://doi.org/10.5194/amt-8-1055-2015>.
31. Soman M. K., Krishna Kumar K. Space-time evolution of the meteorological features associated with the onset of the Indian summer monsoon // *Monthly Weather Review*. 1993. V. 121. P. 1177–1194.
32. Stolbova V., Surovyatkina E., Bookhagen B., Kurths J. Tipping elements of the Indian monsoon: Prediction of onset and withdrawal // *Geophysical Research Letters*. 2016. V. 43. Iss. 8. P. 3982–3990. <https://doi.org/10.1002/2016GL068392>.
33. Surovyatkina E. Forecasting of Indian Monsoon. 2023. <https://www.pik-potsdam.de/members/elenasur/forecasting-indian-monsoon>.
34. Turner A. G., Annamalai H. Climate change and the South Asian summer monsoon // *Nature Climate Change*. 2012. V. 2. P. 587–595. DOI: 10.1038/nclimate1495.
35. Wentz F. A well-calibrated ocean algorithm for Special Sensor Microwave/Imager // *J. Geophysical Research*. 1997. V. 102. Iss. C4. P. 8703–8718. <https://doi.org/10.1029/96JC01751>.
36. Zhang T., Jiang X., Yang S., Chen J et al. A predictable prospect of the South Asian summer monsoon // *Nature Communications*. 2022. No. 13, Article 7080. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-34881-7>.

Study of Indian summer monsoon in the precipitable water vapor field of the atmosphere based on satellite microwave radiometer data

A. V. Kuzmin¹, D. M. Ermakov^{1,2}, E. D. Surovyatkina¹,
E. V. Pashinov¹, S. A. Vtyurin¹

¹ *Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*
E-mail: kuzmin@cosmos.ru

² *Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS,
Fryazino Branch, Fryazino 141190, Moscow Region, Russia*
E-mail: dima@ire.rssi.ru

From SSMIS (Special Sensor Microwave Imager/Sounder) F16-F18 microwave satellite data, daily precipitable water vapor (PWV) fields were obtained from 2012 to 2021 using satellite radiothermometry techniques, both over the World Ocean and over land. The use of satellite radiothermometry made it possible to obtain complete daily PWV fields, eliminating gaps with missing data. From

the PWV fields database, to study the characteristics of the summer monsoon near the Hindustan Peninsula, the fragments for two regions were analyzed: in the Bay of Bengal and the Arabian Sea. A zone of maximum water vapor content over the northern Bay of Bengal (centered at 20° N, 87.5° E) has been identified, which plays the key role in formation of the monsoon over the central and north-eastern regions of India. In this region, there is a relatively smooth increase in PWV with an average trend of +0.33 kg/m² per day from the beginning of March; with the onset of the monsoon it becomes constant, reaching the average value of 62.2 kg/m² for 2012–2021. A decrease in the PWV value from the average value characterizes the end of the monsoon period. An area has been identified in the Arabian Sea that experiences two peaks in water vapor content: during the onset of the monsoon and before the end of the summer monsoon in India, which is attributed to its distance from the coast and the reversal of the Intertropical Convergence Zone (ITCZ) across the Arabian Sea. Observations in this zone can be useful for monitoring the formation of strong cyclones during the passage of the ITCZ through it.

Keywords: global precipitable water vapor fields, summer Indian monsoon, microwave radiometry, satellite radiothermvision

The work was carried out within the framework of the state assignments of Space Research Institute RAS (Monitoring, state reg. No. 122042500031-8) in part of thematic processing and analysis of data, (Upravlenie, state reg. No. 122042500013-4) in terms of methodology and interpretation of results, and Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS (Kosmos-2, state reg. No. 0030-2019-0008) in part of application to processing of interpolation algorithms for eliminating data gaps.

Accepted: 03.05.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-292-306

References

1. Boldyrev V. V., Gorobets N. N., Ilgasov P. A., Nikitin O. V., Pantsov V. Yu., Prokhorov Yu. N., Strelnikov N. I., Streltsov A. M., Cherny I. V., Chernyavsky G. M., Yakovlev V. V., Satellite microwave scanner/probe MTVZA-GYa, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008, Vyp. 5, Vol. 1, pp. 243–248 (in Russian).
2. Ermakov D. M., Global circulation of latent heat in the Earth's atmosphere according to data from satellite radiothermvision, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2018, Vol. 54, No. 9, pp. 1223–1243, DOI: 10.1134/S000143381809013X.
3. Ermakov D. M., Polyakov V. D., Polyakova E. V., Development of a new algorithm for the retrieval of total precipitable water of the atmosphere over land from the data of satellite radiothermal monitoring, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 1, pp. 31–41 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-31-41.
4. Ermakov D. M., Kuzmin A. V., Mazurov A. A. et al., The concept of streaming data processing of Russian satellite microwave radiometers of the MTVZA series based on the IKI-Monitoring Center for collective use, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 4, pp. 298–303 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-298-303.
5. Ermakov D. M., Pashinov E. V., Kuzmin A. V. et al., The Concept of Calculating the Elements of the Regional Hydrological Balance with the Use of Satellite Radiothermvision, *Hydrometeorology and Ecology*, 2023, Vol. 72, pp. 470–492 (in Russian), DOI: 10.33933/2713-3001-2023-72-470-492.
6. Kramchaninova E. K., Uspensky A. B., Determination of near-surface air temperature over land based on data of microwave sounding from satellite Meteor-M No. 1, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 3, pp. 127–136 (in Russian).
7. Kutuza B. G., Danilychev M. V., Yakovlev O. I., *Sputnikovyi monitoring Zemli: Mikrovolnovaya radiometriya atmosfery i poverkhnosti* (Satellite monitoring of the Earth: Microwave radiometry of the atmosphere and surface), Moscow: Lenand, 2016, 336 p. (in Russian).
8. Mitnik L. M., Mitnik M. L., Gurvich I. A., Vykocho A. V., Kuzlyakina Yu. A., Cherny I. V., Chernyavsky G. M., Investigation of tropical cyclone evolution in the Northwest Pacific Ocean from Aqua AMSR-E and Meteor-M No. 1 MTVZA-GYa data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 4, pp. 121–128 (in Russian).
9. Pashinov E. V., Retrieval of integrated water vapor content of the atmosphere over the ocean using MTVZA-GY (Meteor-M No. 2) data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 4, pp. 225–235 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-225-235.

10. Sadovsky I. N., Sazonov D. S., Geographical Reference of MTVZA-GYa's Radiometric Remote Sensing Data, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2022, No. 6, pp. 101–112 (in Russian), DOI: 10.31857/S0205961422060100.
11. Sadovsky I. N., Sazonov D. S., Correction Procedure for MTVZA-GYa Georeference, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2023, No. 6, pp. 73–85 (in Russian), DOI: 10.31857/S0205961423060076.
12. Sazonov D. S., Algorithm for reconstructing ocean surface temperature, near-surface wind speed and integral vapor content from MTVZA-GYa data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 1, pp. 50–64 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-50-64.
13. Sazonov D. S., Study the Possibility of Precipitation Intensity Recovery from MTVZA-GYa Measurements, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2023, Vol. 5, pp. 23–35 (in Russian), DOI: 10.31857/S020596142305007X, EDN: XQPADE.
14. Filei A. A., Andreev A. I., Kuchma M. O., Uspensky A. B., Retrieval of Total Precipitable Water from Meteor-M No. 2-2 MTVZA-GYa Data Using a Neutral Network Algorithm, *Meteorology and Hydrology*, 2022, Vol. 4, pp. 34–45 (in Russian), DOI: 10.52002/0130-2906-2022-4-34-45.
15. Chernyavsky G. M., Mitnik L. M., Kuleshov V. P. et al., Microwave sensing of the ocean, atmosphere and land surface from Meteor-M No. 2 data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 4, pp. 78–100 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-78-100.
16. Sharkov E. A., *Passive Microwave Remote Sensing of the Earth: Physical Foundations*, Berlin: Springer/PRAXIS, 2003, 613 p.
17. Bollasina M. A., Hydrology: Probing the monsoon pulse, *Nature Climate Change*, 2014, Vol. 4, pp. 422–423, <https://doi.org/10.1038/nclimate2243>.
18. Divakarla M. G., Barnet C. D., Goldberg M. D. et al., Validation of Atmospheric Infrared Sounder temperature and water vapor retrievals with matched radiosonde measurements and forecasts, *J. Geophysical Research*, 2006, Vol. 111, Issue D9, Article D09S15, <https://doi.org/10.1029/2005JD006116>.
19. Du J., Kimball J. S., Jones L. A., Satellite microwave retrieval of total precipitable water vapor and surface air temperature over land from AMSR2, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2015, Vol. 53, Issue 5, pp. 2520–2531, DOI: 10.1109/TGRS.2014.2361344.
20. Du J., Kimball J. S., Jones L. A. et al., A global satellite environmental data record derived from AMSR-E and AMSR2 microwave Earth observations, *Earth System Science Data*, 2017, Vol. 9, Issue 2, pp. 791–808, <https://doi.org/10.5194/essd-9-791-2017>.
21. Ermakov D., *Satellite radiothermvision of atmospheric processes: method and applications*, Cham: Springer, 2021, 226 p., <https://doi.org/10.1007/978-3-030-57085-9>.
22. Fan J., Meng J., Ludescher J. et al., Network-based approach and climate change benefits for forecasting the amount of Indian monsoon rainfall, *J. Climate*, 2022, Vol. 35, Issue 3, pp. 1009–1020, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0063.1>.
23. Gadgil S., The Indian monsoon and its variability, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2003, Vol. 31, pp. 429–467, DOI: 10.1146/annurev.earth.31.100901.141251.
24. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al., The ERA5 global reanalysis, *Quarterly J. Royal Meteorological Society*, 2020, Vol. 146, Issue 730, pp. 1999–2019, <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.
25. Hollinger J. P., *DMSP Special Sensor Microwave/Imager Calibration/Validation, Final Report, Vol. 1*, Space Sensing Branch, Naval Research Laboratory, Washington, DC, 1988, 190 p.
26. Imaoka K., Maeda T., Kachi M. et al., Status of AMSR2 instrument on GCOM-W1, *Proc. SPIE, Vol. 8528, Earth Observing Missions and Sensors: Development, Implementation, and Characterization II*, 2012, Article 852815, <https://doi.org/10.1117/12.977774>.
27. Koike T., Nakamura Y., Kaihotsu I. et al., Development of an Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR-E) algorithm of soil moisture and vegetation water content, *Proc. Hydraulic Engineering*, 2004, Vol. 48, pp. 217–222, DOI: <https://doi.org/10.2208/prohe.48.217>.
28. Kunkee 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, Vol. 46, pp. 863–883, DOI: 10.1109/tgrs.2008.917980.
29. Ludescher J., Martin M., Boers N. et al., Network-based Forecasting of Climate Phenomena, *Proc. National Academy of Sciences (PNAS)*, 2021, Vol. 118, No. 47, Article e1922872118, <https://doi.org/10.1073/pnas.1922872118>.
30. Sivira R. G., Brogniez H., Mallet C., Oussar Y., A layer-averaged relative humidity profile retrieval for microwave observations: design and results for the Megha-Tropiques payload, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, Vol. 8, pp. 1055–1071, <https://doi.org/10.5194/amt-8-1055-2015>.
31. Soman M. K., Krishna Kumar K., Space-time evolution of the meteorological features associated with the onset of the Indian summer monsoon, *Monthly Weather Review*, 1993, Vol. 121, pp. 1177–1194.
32. Stolbova V., Surovyatkina E., Bookhagen B., Kurths J., Tipping elements of the Indian monsoon: Prediction of onset and withdrawal, *Geophysical Research Letters*, 2016, Vol. 43, Issue 8, pp. 3982–3990, <https://doi.org/10.1002/2016GL068392>.

33. Surovyatkina E., *Forecasting of Indian Monsoon*, 2023, <https://www.pik-potsdam.de/members/elenasur/forecasting-indian-monsoon>.
34. Turner A. G., Annamalai H., Climate change and the South Asian summer monsoon, *Nature Climate Change*, 2012, Vol. 2, pp. 587–595, DOI: 10.1038/nclimate1495.
35. Wentz F., A well-calibrated ocean algorithm for Special Sensor Microwave/Imager, *J. Geophysical Research*, 1997, Vol. 102, Issue C4, pp. 8703–8718, <https://doi.org/10.1029/96JC01751>.
36. Zhang T, Jiang X., Yang S., Chen J. et al., A predictable prospect of the South Asian summer monsoon. *Nature Communications*, 2022, No. 13, Article 7080, <https://doi.org/10.1038/s41467-022-34881-7>.