

# Исследование летнего муссона близ полуострова Индостан в поле интегрального влагосодержания атмосферы по данным спутниковых микроволновых радиометров. Часть 1

А. В. Кузьмин<sup>1</sup>, Д. М. Ермаков<sup>1,2</sup>, А. Г. Головкин<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> *Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники  
им. В. А. Котельникова РАН, Фрязино, Московская обл., 141190, Россия  
E-mail: dima@ire.rssi.ru*

Проведён анализ интегрального влагосодержания атмосферы (ИВА) в летний период индийского муссона за 2012–2021 гг. Для получения ИВА используются микроволновые радиометрические данные инструмента SSMIS (*англ.* Special Sensor Microwave Imager/Sounder) спутников F16–F18. По этим данным в ИКИ РАН была создана база глобальных ежедневных полей ИВА за период с 2012 по 2023 г. В восстановлении ИВА из данных SSMIS использовалась технология искусственных нейронных сетей и методика подхода спутникового радиотепловидения. Таким образом были получены ежесуточные поля ИВА за 2012–2021 гг. по радиометрическим данным SSMIS F16–F18 каналов 1–18 с интервалом 3 ч на координатной сетке  $0,25 \times 0,25^\circ$ . В первой части статьи исследуются 11 районов вокруг полуострова Индостан. Каждый район был выбран размером  $5 \times 5^\circ$ . Шесть из этих районов находятся над акваториями Аравийского моря, Бенгальского залива и Индийского океана, а пять районов расположены на суше — на северо-западе Индии, на границе с Пакистаном и на севере вдоль Гималаев. Для примера приведены и проанализированы данные ИВА за 2016 г. Эти данные ИВА сравниваются с данными суммарно выпавших осадков, взятых по реанализу ERA5. Исследования показали, что во всех изучаемых районах наблюдается высокая корреляция динамики суммарно выпавших осадков и величин ИВА. Возрастание ИВА происходит перед периодом дождей примерно с марта до начала муссона, затем ИВА выходит на условно постоянные значения, «плато», и в течение этого периода происходят интенсивные дожди. Затем наблюдается резкое снижение ИВА с окончанием периода дождей. Это последовательное изменение ИВА может служить шаблоном для прогноза в каждом районе начала и окончания муссона. Во второй части статьи мы проведём построение среднего шаблона для каждого района по данным ИВА за 2012–2021 гг.

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

Одобрена к печати: 13.11.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-365-379

## Введение

Южноазиатские муссонные дожди серьёзно влияют на всю сельскохозяйственную и смежную инфраструктуру Индии и соседних с ней стран. Муссонные дожди определяют образ жизни населения Индийского субконтинента, численность которого приближается к двум миллиардам. Летний сезон муссонов длится четыре месяца и приносит на полуостров до 80 % годового количества осадков. С другой стороны, южноазиатский муссон действует как явление климатического маятника, которое влияет на большую часть тропической Евразии и Индийского океана. Исследование климата Земли — анализ и прогнозирование изменений в широком диапазоне временных и пространственных масштабов, несомненно, является фундаментальной научной проблемой, которая затрагивает широкий круг социальных, гуманитарных и экономических аспектов.

Муссоны оказывают значительное влияние на сельское хозяйство и смежные с ним отрасли в Индии и других близлежащих странах. Тем, кто занимается сельскохозяйствен-

ным производством, крайне важно заранее знать даты начала и окончания периода муссонов. Задержка или раннее его начало в том или ином регионе может привести к огромным потерям. Именно по этой причине муссон активно изучается с использованием различных методов дистанционного зондирования, чтобы как можно точнее предсказать его начало и развитие. Метеорологический департамент Индии предоставляет прогноз муссона за 14 дней только штату Керала, расположенному на юго-западной оконечности Индостана, тогда как для остальных 27 штатов прогноза прихода муссона не делается.

Один из подходов к решению проблемы прогноза начала и завершения муссона был предложен в работе (Stolbova et al., 2016), разработанная методология показала возможность прогнозирования начала муссона в Центральной Индии за 40 дней и для завершения — за 70 дней как ретроспективно (1951–2015), так и в перспективе (2016–2023) (Ludescher et al., 2021). В публикации (Fan et al., 2022) был предложен новый подход, основанный на теории графов, для прогнозирования количества муссонных осадков в четырёх регионах в 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 влагосодержания атмосферы (ИВА) Земли (Кутуза и др., 2016; Шарков, 2014) в широком диапазоне пространственно-временных масштабов.

Для восстановления ИВА традиционно используются микроволновые радиометрические измерения вблизи линии поглощения водяного пара 22,235 ГГц. Такие измерения хорошо пригодны для восстановления ИВА над поверхностью воды, но малоприспособлены для восстановления над сушей. Причиной этого становится большая излучательная способность покровов суши и достаточно слабая поглощающая способность атмосферы в области 22 ГГц. Изменение излучения атмосферы водяным паром на 22 ГГц практически невозможно различить на фоне ярких покровов суши, обладающих сильной изменчивостью излучательной способности. Решением данной проблемы может быть использование дополнительных измерений на частотах с более сильным поглощением в атмосферном водяном паре в диапазоне 150–200 ГГц. Такой возможностью обладают радиометры серии SSMIS (*англ.* Special Sensor Microwave–Imager/Sounder), функционирующие одновременно на нескольких спутниках DMSP (*англ.* Defense Meteorological Satellite Program) F16, F17, F18 и выполняющие наблюдения в близкое местное время. Прибор SSMIS имеет 24 радиометрических канала на частотах от 19 до 200 ГГц и конический тип сканирования под углом 53° (Kunkee et al., 2008).

На основе данных SSMIS спутников F16–F18 в ИКИ РАН была создана база глобальных ежедневных полей ИВА за период с 2012 по 2023 г., периодически пополняемая. В восстановлении ИВА из данных SSMIS использовалась технология искусственных нейронных сетей ANN (*англ.* Artificial Neural Network), для чего была создана модель нейронной сети прямого распространения. Обучающие данные взяты из реанализа ECMWF ERA5 (*англ.* European Centre of Medium-range Weather Forecasts Reanalysis v.5) за 2020 г., а тестирование проводилось на 3 млн сопоставленных данных. Результаты показали, что среднеквадратичная ошибка восстановления ИВА с использованием нейронной сети составляет 2,4 мм в среднем над океаном и сушей, а на суше — около 3 мм. Подробное описание приведено в работе (Ермаков и др., 2023).

Одна из проблем непосредственного использования данных SSMIS для анализа интегрального влагосодержания заключается в наличии лакун в спутниковых данных. Схема сканирования SSMIS не позволяет получать полного покрытия данными всего земного шара по одному спутнику, из-за чего между областями измерений остаются существенные пропуски. Принципиальная возможность построения глобальных полей ИВА и их интерполяции по времени с шагом до 3 ч продемонстрирована в рамках подхода спутникового радиотепловидения (Ермаков, 2021). 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 отсутствующие данные одного спутника данными с другого. Временной промежуток между измерениями

ями 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). Интерполяция по времени осуществляется специальной методикой, суть которой состоит в вычислении такого поля скорости горизонтального переноса, которое оптимальным образом описывает последовательную трансформацию полей интегрального влагосодержания, выстроенных в хронологическом порядке, при дополнительных ограничительных требованиях (непрерывности, гладкости).

Таким образом были получены глобальные поля ИВА за 2012–2023 гг. по радиометрическим данным TDR (*англ.* Temperature Data Record) Base (L1A) SSMIS F16–F18 каналов 1–18 с интервалом 3 ч на координатной сетке  $0,25 \times 0,25^\circ$ .

### Район исследований

Объект исследования — широкая область вокруг полуострова Индостан. На *рис. 1* (см. с. 368) представлены примеры полей ИВА вокруг полуострова Индостан за период с 8 мая по 28 июля 2016 г. Чтобы устранить синоптические вариации ИВА и получить параметры крупномасштабной по пространству и времени тенденции изменения ИВА над выбранными районами, эмпирически был подобран интервал осреднения, при котором эта тенденция проявлялась достаточно чётко (возмущения в неё вносят различные процессы синоптических масштабов и мезомасштабов, в том числе тропические циклоны, атмосферные реки). Представленные данные были усреднены в скользящем пятнадцатидневном окне, и графики изолиний показаны через каждые 10 дней. Если проследить, например, за изолинией 55 или  $60 \text{ кг/м}^2$ , то можно увидеть, как поднимается внутритропическая зона конвергенции (ВЗК). Так, если 8 мая изолиния  $55 \text{ кг/м}^2$  находится примерно на широте  $10^\circ \text{ с. ш.}$ , то в следующие дни она начинает подниматься в северо-восточном направлении, затрагивая западную часть Индии. Эта изолиния 8 июня расположилась уже на северо-востоке и востоке Индии, а в дальнейшие дни движется с востока на запад к границе с Пакистаном. Такие поля ИВА отражают региональное движение ВЗК с мая по июль с юго-востока на северо-запад, хотя индийский муссон называют юго-западным, так как преобладающие ветра в этом регионе в этот период юго-западные.

В работе (Кузьмин и др., 2024) были проанализированы средние значения поля интегрального влагосодержания внутри двух районов у берегов полуострова Индостан. Первый район в Бенгальском заливе представлял собой квадрат  $3 \times 3^\circ$  с центром в точке  $20^\circ \text{ с. ш.}$ ,  $87,5^\circ \text{ в. д.}$ , в котором выявлено максимальное содержание водяного пара в северной части Бенгальского залива. Второй район такого же размера выбран для сравнения на той же широте в Аравийском море с центром в точке  $20^\circ \text{ с. ш.}$ ,  $64,5^\circ \text{ в. д.}$  Выбор этих двух районов позволил провести анализ влияния потоков водяного пара в Аравийском море и Бенгальском заливе — в районах, которые обеспечивают приток влаги в период муссона на территорию Индостана. Эти исследования показали, что район Бенгальского залива служит своеобразной областью накопления водяного пара, и в нём происходит возрастание ИВА со средним трендом  $+0,33 \text{ кг/м}^2$  в сутки с начала марта. С началом муссона ИВА выходит здесь на постоянную величину со средним значением за 2012–2021 гг.  $62,2 \text{ кг/м}^2$ . Снижение ИВА от среднего значения характеризует окончание периода муссона.

В представленном здесь исследовании мы решили расширить количество анализируемых районов и расположить их так, чтобы они находились вокруг полуострова Индостан для более полного анализа динамики ИВА. Таким образом, исследовались 11 районов размером  $5 \times 5^\circ$  каждый (*рис. 2*, см. с. 369), координаты районов представлены в *табл. 1*. Шесть из этих районов находятся в океане, а пять — на северо-западе Индии, на границе с Пакистаном и на севере вдоль Гималаев. Участки 7–11 расположены на суше, поэтому точность определения ИВА в этих районах чуть хуже, чем над океаном (Ермаков и др., 2023).

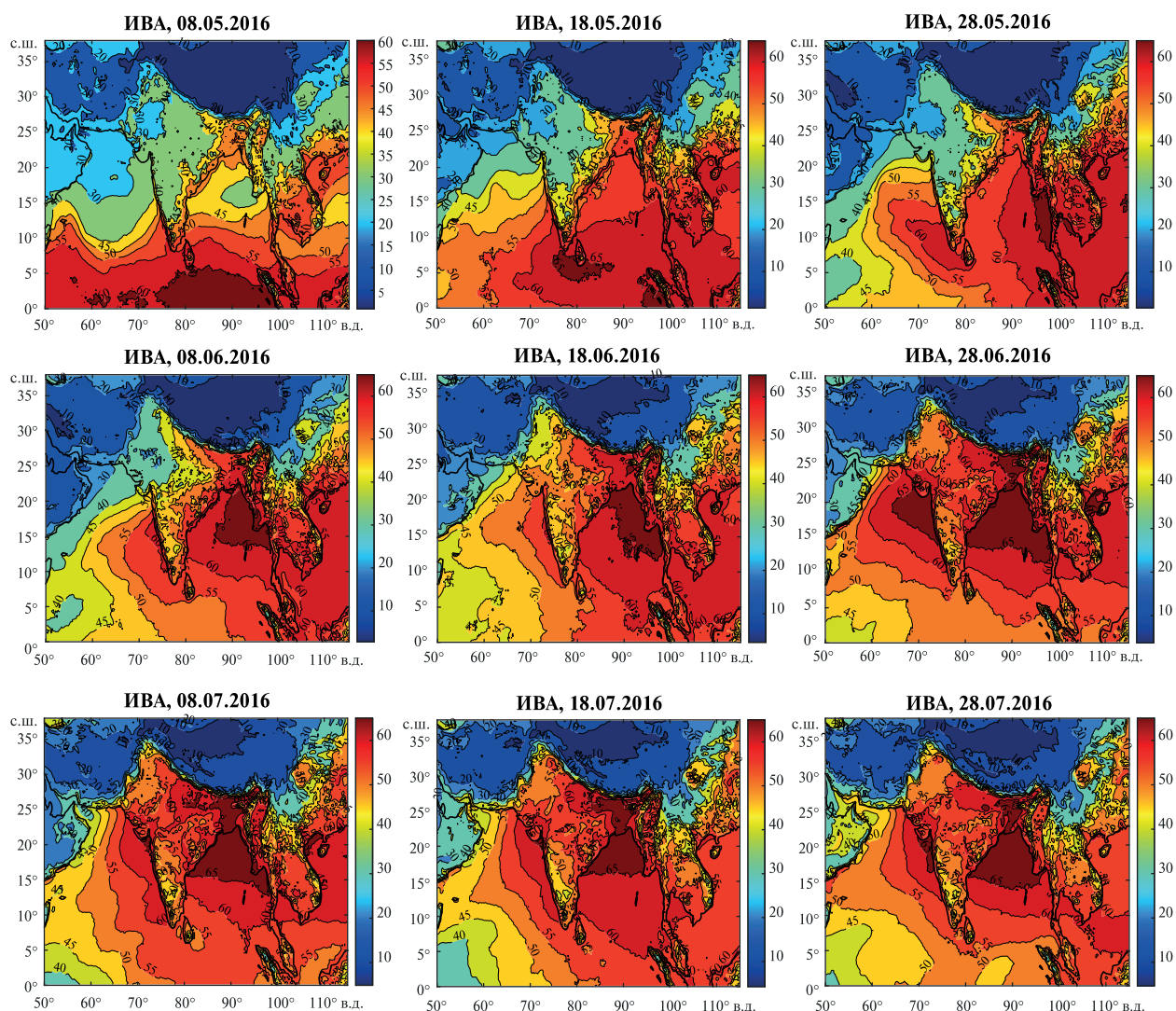


Рис. 1. Карты ИВА, построенные по микроволновым данным в широком районе вокруг полуострова Индостан с 8 мая по 28 июля 2016 г. Для устранения синоптических вариаций ИВА представленные данные были усреднены за 15 дней, графики изолиний показаны через каждые 10 дней. Шкала ИВА дана в  $\text{кг}/\text{м}^2$

Таблица 1. Координаты анализируемых регионов

| № района | Левый нижний угол |        | Правый верхний угол |        | Центр |        |
|----------|-------------------|--------|---------------------|--------|-------|--------|
|          | с. ш.             | в. д.  | с. ш.               | в. д.  | с. ш. | в. д.  |
| 1        | 18°               | 63°    | 23°                 | 68°    | 20,5° | 65,5°  |
| 2        | 13°               | 67°    | 18°                 | 72°    | 15,5° | 69,5°  |
| 3        | 8°                | 69,5°  | 13°                 | 74,5°  | 10,5° | 72°    |
| 4        | 3°                | 74,5°  | 8°                  | 79,5°  | 5,5°  | 77°    |
| 5        | 9,4°              | 80,35° | 14,4°               | 85,35° | 11,9° | 82,85° |
| 6        | 14,4°             | 85°    | 19,4°               | 90°    | 16,9° | 87,5°  |
| 7        | 23°               | 68°    | 28°                 | 73°    | 25,5° | 70,5°  |
| 8        | 28°               | 71°    | 33°                 | 76°    | 30,5° | 73,5°  |
| 9        | 24,5°             | 76°    | 29,5°               | 81°    | 27°   | 78,5°  |
| 10       | 22,5°             | 81°    | 27,5°               | 86°    | 25°   | 83,5°  |
| 11       | 21,5°             | 86°    | 26,5°               | 91°    | 24°   | 88,5°  |

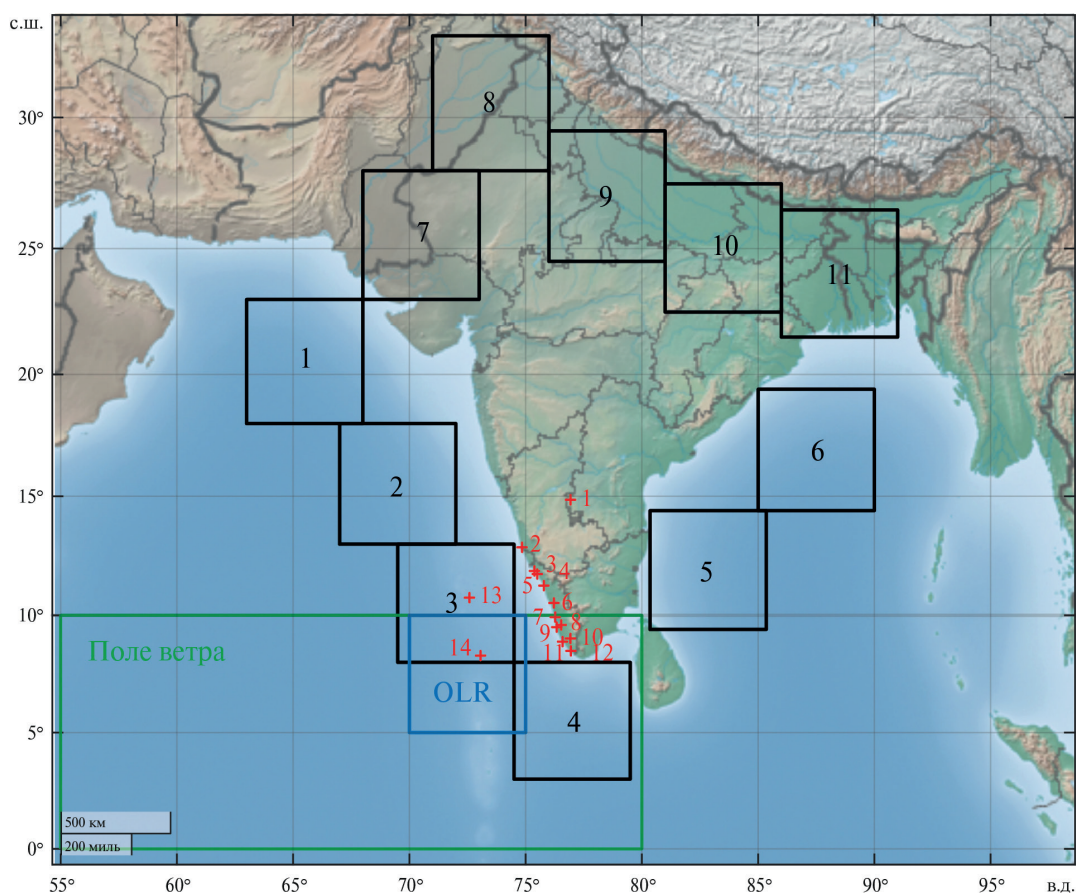


Рис. 2. Одиннадцать районов для анализа динамики полей ИВА (чёрные квадраты), географические координаты углов каждой области даны в табл. 1. Красные кресты — индийские метеостанции (табл. 2), синий квадрат — район оценки уходящей длинноволновой радиации OLR (англ. Outgoing Longwave Radiation), зелёный прямоугольник — район анализа поля ветра

Таблица 2. Прибрежные метеостанции на территории континентальной Индии и индийских островах, которые задействованы в определении начала муссона

| №  | Координаты |            | Метеостанция     | Описание  |
|----|------------|------------|------------------|---|
|    | с. ш.      | в. д.      |                  |   |
| 1  | 14,852956° | 76,930320° | Кудулу           | Штат Андхра-Прадеш, Анантапур-Дистрикт, Д.-Хирхал-Мандал, деревня Кудулур |
| 2  | 12,867299° | 74,846650° | Мангалор         | Штат Карнатака, город Мангалур  |
| 3  | 11,875001° | 75,379234° | Каннур           | Штат Керала, город Каннур   |
| 4  | 11,744476° | 75,499645° | Талассери        | Штат Керала, город Телличерри   |
| 5  | 11,255054° | 75,783773° | Кожикод          | Штат Керала, город Каликут  |
| 6  | 10,523007° | 76,216419° | Триссур          | Штат Керала, город Тричур   |
| 7  | 9,924640°  | 76,270705° | Кочи             | Штат Керала, город Кочин  |
| 8  | 9,591748°  | 76,530803° | Коттаям          | Штат Керала, город Коттаям  |
| 9  | 9,497996°  | 76,337342° | Аллеппи          | Штат Керала, город Аллеппи  |
| 10 | 9,017814°  | 76,927319° | Пуналур          | Штат Керала, город Пуналур  |
| 11 | 8,882885°  | 76,587388° | Коллам           | Штат Керала, город Коллам   |
| 12 | 8,489695°  | 76,946606° | Тируванантапурам | Штат Керала, город Тируванантапурам                                       |
| 13 | 10,747093° | 72,583282° | Амини            | Союзная территория Лакшадвип  |
| 14 | 8,289572°  | 73,060261° | Остров Миникой   | Союзная территория Лакшадвип, остров Миникой                              |

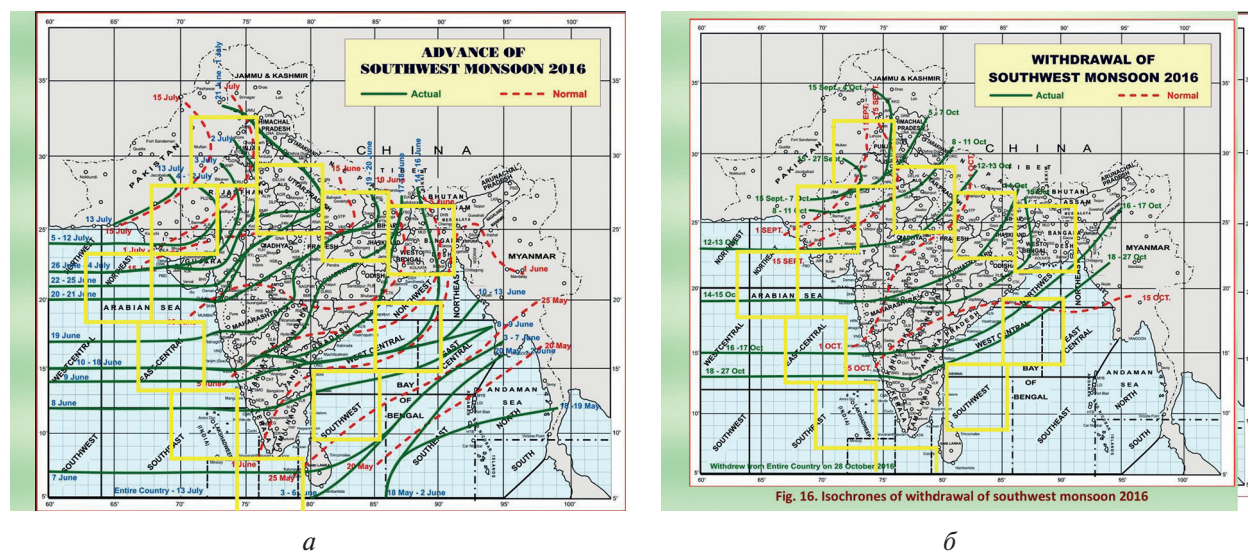
## Полученные результаты

Рассмотрим на примере 2016 г. распространение ИВА в обозначенных районах. Наряду с ИВА будут приведены данные о сумме выпавших за сутки осадков в районе, рассчитанной по информации из реанализа ERA5 (ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present). Начало и конец периода муссона для каждого района были взяты из отчёта Индийского метеорологического департамента (ИМД) (*англ.* India Meteorological Department) ([https://metnet.imd.gov.in/docs/imdnews/ANNUAL\\_REPORT2016English.pdf](https://metnet.imd.gov.in/docs/imdnews/ANNUAL_REPORT2016English.pdf)). На сайте ИМД описаны критерии определения даты начала ([https://mausam.imd.gov.in/responsive/monsooninformation\\_onset.php](https://mausam.imd.gov.in/responsive/monsooninformation_onset.php)) юго-западного муссона. О начале муссона можно утверждать только при выполнении следующих условий:

1. *Количество осадков.* Если после 10 мая 60 % из 14 прибрежных метеостанций на территории континентальной Индии и индийских островах (см. *рис. 2*, красные крестики) зафиксируют осадки до 2,5 мм в сутки или более в течение двух последовательных дней, то начало муссона над штатом Керала объявляется на второй день при условии выполнения дополнительных требований.

2. *Поле ветра.* Глубина западных ветров должна сохраняться до уровня 600 гПа в области, ограниченной экватором и 10° с.ш., 55° в.д. и 80° в.д. (см. *рис. 2*, зелёный контур). Скорость зонального ветра в районе, ограниченном 5–10° с.ш. и 70–80° в.д., должна составлять порядка 15–20 узлов на уровне 925 гПа. Источником данных могут служить анализ ветров RSMC (*англ.* Regional Specialized Meteorological Centre) (<https://rsmcnwdelhi.imd.gov.in>) или данные о ветрах, полученные со спутников INSAT-3D (*англ.* Indian National SATellite), INSAT-3DR и INSAT-3DS.

3. *Уходящая длинноволновая радиация.* Значение OLR, полученное с помощью спутника INSAT, должно быть ниже 200 Вт/м<sup>2</sup> в области, ограниченной 5–10° с.ш. и 70–75° в.д. (см. *рис. 2*, синий контур).



*Рис. 3.* Комплексные изображения вблизи полуострова Индостан изолиний начала (*а*) и конца (*б*) муссона, представленные Индийским метеорологическим департаментом ([https://metnet.imd.gov.in/docs/imdnews/ANNUAL\\_REPORT2016English.pdf](https://metnet.imd.gov.in/docs/imdnews/ANNUAL_REPORT2016English.pdf)), с наложенными квадратами районов анализа ИВА (жёлтый цвет), красные пунктирные изолинии показывают среднее за много лет наблюдений, зелёные линии — данные 2016 г.

Как можно видеть, критерии начала летнего муссона в Индии достаточно сложны. Возможная связь с динамикой поля ИВА носит косвенный характер, в то время как именно высокое содержание водяного пара в атмосфере определяет возможность длительного выпа-

дения большого количества осадков. Таким образом, приведённые критерии хороши в качестве независимых диагностических признаков, но не отражают непосредственной физической причины формирования муссона (существенного увеличения общего содержания водяного пара в атмосфере над территорией исследования).

На *рис. 3* (см. с. 370) визуализированы временные интервалы (начало и окончание) муссона на территории Индостана по данным ИМД за 2016 г. и среднемноголетнее с наложенными контурами районов анализа ИВА. Поскольку районы различаются географическим расположением, время начала муссона также варьируется (*табл. 3*).

В *табл. 3*, наряду с данными начала и конца муссона, взятыми по изображениям, представленным на *рис. 3*, приведены даты, определённые для описанных выше квадратов 1–11 по средним значениям выпавших осадков (по ERA5) и средним значениям ИВА. Определение начала муссона по данным ERA5 и ИВА выполнялось по следующим критериям:

1) сумма выпавших осадков в сутки должна превышать 2 мм и продолжительность осадков составлять не менее 15 дней;

2) значение ИВА должно достигать примерно среднего уровня для периода дождей.

Окончание муссона по данным ERA5 определялось, когда величина выпавших осадков в районе уменьшалась до 1 мм и значение ИВА снижалось до уровня менее 35 кг/м<sup>2</sup>.

*Таблица 3.* Даты начала и конца муссона в каждом районе, взятые из данных ИМД и по данным реанализа ERA5

| № района | Дата начала муссона |                         | Дата конца муссона       |                         |
|----------|---------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|
|          | ИМД                 | ERA5+влажзапас по SSMIS | ИМД                      | ERA5+влажзапас по SSMIS |
| 1        | 22–25 июня          | 19 июня                 | 14–15 октября            | 5 октября               |
| 2        | 10–18 июня          | 23 мая                  | 16–18 октября            | 12 октября              |
| 3        | 8 июня              | 15 мая                  | —                        | 18 октября              |
| 4        | 3–7 июня            | 5 мая                   | —                        | —                       |
| 5        | 8 июня              | 3 июня                  | —                        | —                       |
| 6        | 8–9 июня            | 1 июня                  | 16–27 октября            | —                       |
| 7        | 5–12 июля           | 24 июня                 | 15 сентября – 11 октября | 7 октября               |
| 8        | 2–3 июля            | 25 июня                 | 15–27 сентября           | 2 сентября              |
| 9        | 21 июня – 1 июля    | 12 июня                 | 8–13 октября             | 9 октября               |
| 10       | 19–20 июня          | 10 июня                 | 11 октября               | 9 октября               |
| 11       | 14–18 июня          | 8 июня                  | 15 октября               | 13 октября              |

Рассмотрим подробнее особенности каждого района.

*Район 1* с центром в точке 20,5° с. ш. и 65,5° в. д. находится в Аравийском море у побережья на границе Индии и Пакистана. Данные с 1 марта по 1 ноября 2016 г. о ИВА и выпавших осадках представлены на *рис. 4а* (см. с. 372). С марта по середину мая средний уровень ИВА равен 27,6 кг/м<sup>2</sup>. Начало муссона по ИМД определено в рамках 22–25 июня, а окончание — 14–15 октября. Однако дожди начинаются раньше, примерно 19 июня, в этот момент значение ИВА превышает 45 кг/м<sup>2</sup>. Среднее значение ИВА за время периода дождей равно 47,7 кг/м<sup>2</sup>. Окончание муссона происходит, когда ИВА становится менее 35 кг/м<sup>2</sup>, что случилось также раньше, чем указано у ИМД, 5 октября. Синоптические процессы, происходящие в этом морском районе, имеют сильные вариации интенсивности от сезона к сезону, дожди могут возникать снова во время прихода циклона или атмосферной реки, но длятся недолго.

Для *района 2* с центром в точке 15,5° с. ш. и 69,5° в. д., который также находится в Аравийском море, но юго-восточнее района 1 у побережья Индии, данные ИВА и выпавших осадков приведены на *рис. 4б*. Среднее значение ИВА в весенний период равно 28 кг/м<sup>2</sup>,

а возрастание ИВА начинается 1 мая 2016 г. Начало периода дождей по данным ERA5 произошло 23 мая (ИВА в этот момент превысило  $50 \text{ кг/м}^2$ ), в то время как по данным ИМД началом периода дождей считается 10–18 июня 2016 г. Следует отметить тот факт, что 10–18 июня наблюдается значительное уменьшение количества выпавших осадков в этом районе и 19 июня происходит резкое возрастание интенсивности дождя (ИВА достигает  $60\text{--}62 \text{ кг/м}^2$ ). Среднее ИВА за время периода дождей равно  $51,4 \text{ кг/м}^2$ . Период дождей заканчивается 12 октября, в это время ИВА снижается до значений  $35 \text{ кг/м}^2$ . По данным ИМД конец периода муссонов 16–18 октября. Этот регион чувствует смещение ВЗК на север раньше, чем район 1. Интенсивность синоптических процессов, происходящих в этом морском районе, имеет сильные вариации от сезона к сезону, дожди могут возникать снова вовремя прихода циклона или атмосферной реки, но длятся недолго.

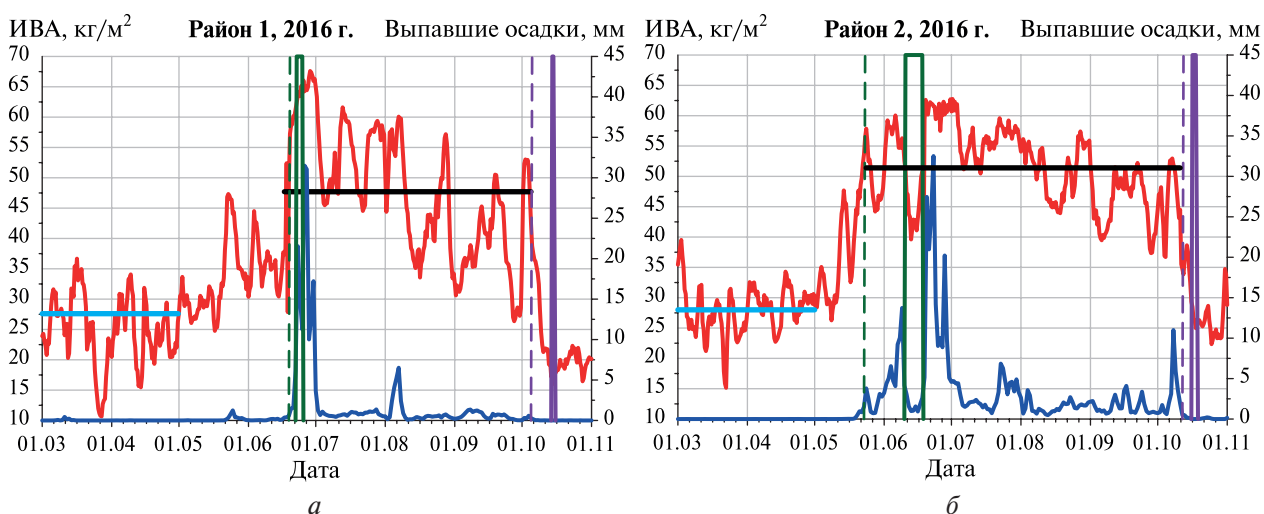


Рис. 4. Данные ИВА (красная кривая) и суточных осадков (по ERA5, синяя кривая) для районов 1 (а) и 2 (б). Зелёные вертикальные линии показывают начало периода муссонов, сиреневые — окончание по данным ИМД; штриховые линии — по осадкам из реанализа ERA5. Голубая прямая демонстрирует средний уровень ИВА за весенний период с 1 марта по 1 мая, чёрная линия — средний уровень за период муссона

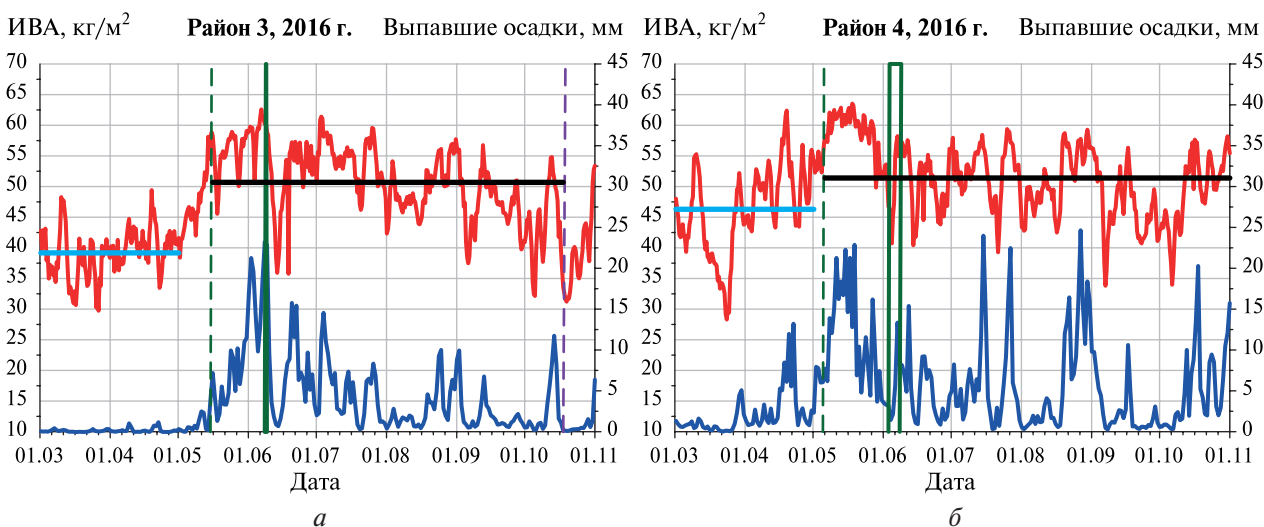


Рис. 5. Данные ИВА (красная кривая) и суточных осадков (по ERA5, синяя кривая) для районов 3 (а) и 4 (б). Зелёные вертикальные линии показывают начало периода муссонов, сиреневые — окончание по данным ИМД; штриховые линии — по осадкам из реанализа ERA5. Голубая прямая демонстрирует средний уровень ИВА за весенний период с 1 марта по 1 мая, чёрная линия — средний уровень за период муссона

**Район 3** с центром в точке  $10,5^{\circ}$  с.ш. и  $72^{\circ}$  в.д. находится в Аравийском море, смещён ещё далее на юго-восток от районов 1 и 2, у побережья Индии в непосредственной близости от штата Керала. Этот район ещё ближе расположен к ВЗК, поэтому уровень ИВА (рис. 5а, см. с. 372) здесь выше в весенний период и составляет в среднем  $39,2 \text{ кг/м}^2$ , превышая  $45 \text{ кг/м}^2$  при прохождении циклона или атмосферной реки, таким образом, что небольшие осадки существуют всё время. Более интенсивные дожди начинаются 15 мая, когда значение ИВА превысило  $55 \text{ кг/м}^2$ , самые интенсивные дожди происходят с 2 июня, когда ИВА достигает  $60 \text{ кг/м}^2$  и более. Начало периода дождей по данным ИМД произошло 8 июня, а окончание не определено. Среднее значение ИВА за время периода дождей, который сохраняется до середины октября, равно  $50,7 \text{ кг/м}^2$ . В этом районе процессы, связанные со смещением ВЗК на север, начинаются ещё раньше, чем в районе 2, и протекают здесь практически до декабря, сильные осадки происходят снова во время прихода циклона или атмосферной реки.

**Район 4** с центром в точке  $5,5^{\circ}$  с.ш. и  $77^{\circ}$  в.д. самый южный, он находится в Индийском океане у южной оконечности полуострова Индостан и с восточной стороны у берегов Шри-Ланки. Этот район расположен около термического экватора, дожди здесь идут практически круглый год. Среднее значение ИВА (см. рис. 5б) в весенний период равно  $46,3 \text{ кг/м}^2$ . Выделить в этом районе по данным ERA5 начало периода дождей довольно затруднительно. Наиболее интенсивные дожди начинаются с началом мая, так, 5 мая ИВА достигает  $55 \text{ кг/м}^2$ , а 10 мая —  $62 \text{ кг/м}^2$ , когда следует период интенсивных осадков. Среднее значение ИВА за время периода дождей, который мы ограничили началом ноября, равно  $51,4 \text{ кг/м}^2$ . Начало периода дождей по данным ИМД в этом районе 3–7 июня, а окончание, как и в районе 3, не определено. Выпадение значительных осадков в этом районе практически не заканчивается вплоть до декабря.

**Район 5** с центром в точке  $11,9^{\circ}$  с.ш. и  $82,85^{\circ}$  в.д. находится в Бенгальском заливе, напротив района 3, у побережья Индии. Среднее значение ИВА в весенний период находится на уровне  $30,8 \text{ кг/м}^2$ , ИВА начинает расти (рис. 6а) с первой декады марта и достигает  $60 \text{ кг/м}^2$  в первых числах июня, когда начинаются дожди. Следует отметить, что в этом районе проходят интенсивные дожди с 12 по 19 мая. Начало периода дождей по данным ИМД приходится на 8 июня, а конец не определён. Период дождей сохраняется до конца октября по данным ERA5, среднее значение ИВА за этот период равно  $54,3 \text{ кг/м}^2$ . Синоптические процессы, происходящие в этом морском регионе, сильно варьируют по интенсивности от сезона к сезону, дожди возникают снова во время прихода циклона или атмосферной реки.

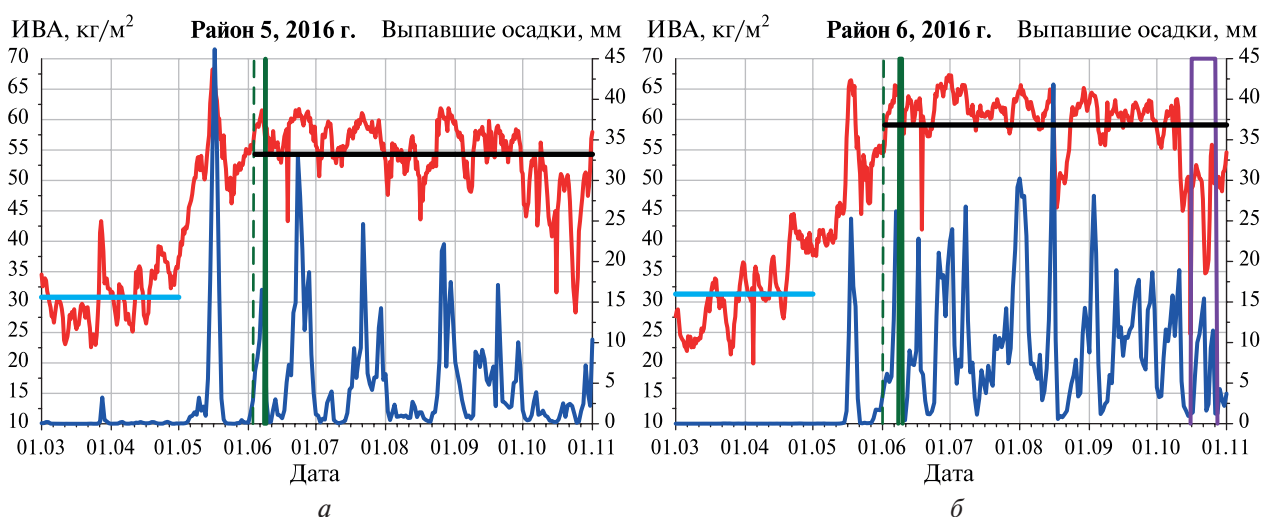


Рис. 6. Данные ИВА (красная кривая) и суточных осадков (по ERA5, синяя кривая) для районов 5 (а) и 6 (б). Зелёные вертикальные линии показывают начало периода муссонов, сиреневые — окончание по данным ИМД; штриховые линии — по осадкам из реанализа ERA5. Голубая прямая демонстрирует средний уровень ИВА за весенний период с 1 марта по 1 мая, чёрная линия — средний уровень за период муссона

**Район 6** с центром в точке  $16,9^\circ$  с. ш. и  $87,5^\circ$  в. д. находится в Бенгальском заливе, напротив района 2 через полуостров Индостан, у побережья Индии. Он примерно соответствует первому району в работе (Кузьмин и др., 2024), в котором выявлено максимальное содержание водяного пара в северной части Бенгальского залива. Среднее значение ИВА (см. рис. 6б) в весенний период находится на уровне  $31,3 \text{ кг/м}^2$ . Сильные осадки выявлены по данным ERA5 15–19 мая, когда значение ИВА превышает  $45 \text{ кг/м}^2$ , затем осадки ослабевают, хотя ИВА держится в районе значений  $50\text{--}55 \text{ кг/м}^2$ . Существенные осадки возобновляются 1 июня. Начало периода дождей по данным ИМД определено 8–9 июня, а окончание — 16–23 октября, однако по данным ERA5 осадки прекращаются только в самом конце октября — 25–30 числа. Среднее значение ИВА за этот период равно  $59,1 \text{ кг/м}^2$ . Шестой район отличается тем, что в нём накапливается водяной пар и высокие значения ИВА сохраняются там довольно долго, так что дожди возобновляются вплоть до декабря.

**Район 7** с центром в точке  $25,5^\circ$  с. ш. и  $70,5^\circ$  в. д. находится севернее района 1 около Аравийского моря на суше, захватывая пограничные районы Индии и Пакистана. Среднее значение ИВА (рис. 7а) в весенний период равно  $23,7 \text{ кг/м}^2$ , увеличение ИВА наблюдается примерно с начала мая. Осадки начинаются, когда значения ИВА возрастают до  $50\text{--}52 \text{ кг/м}^2$ , что происходит 24 июня. По данным ИМД начало периода дождей 5–12 июля, а конец муссона 15 сентября – 11 октября. Среднее значение ИВА за период муссона равно  $46,1 \text{ кг/м}^2$ . Период дождей заканчивается, когда ИВА снижается до величины  $35\text{--}40 \text{ кг/м}^2$ , что согласуется с динамикой осадков по ERA5. Район 7 близок к Аравийскому морю и району 1, и все вариации водяного пара, происходящие в районе 1, отражаются в полях ИВА района 7.

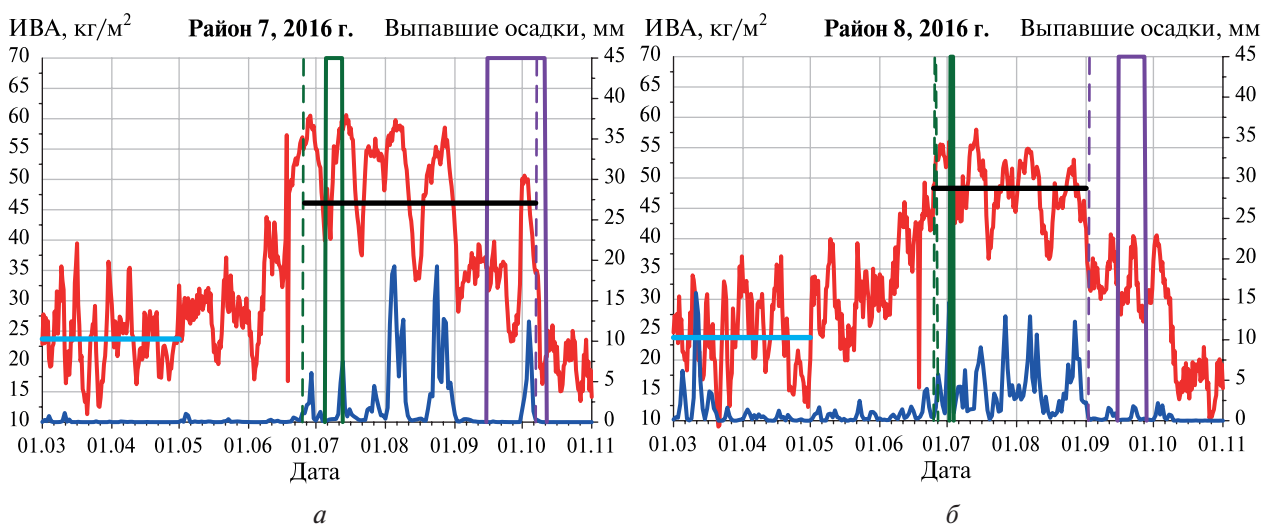


Рис. 7. Данные ИВА (красная кривая) и суточных осадков (по ERA5, синяя кривая) для районов 7 (а) и 8 (б). Зелёные вертикальные линии показывают начало периода муссонов, сиреневые — окончание по данным ИМД; штриховые линии — по осадкам из реанализа ERA5. Голубая прямая демонстрирует средний уровень ИВА за весенний период с 1 марта по 1 мая, чёрная линия — средний уровень за период муссона

**Район 8** с центром в точке  $30,5^\circ$  с. ш. и  $73,5^\circ$  в. д. находится севернее района 7 на суше около предгорья Гималаев, захватывая пограничные районы Индии и Пакистана. Видимо, близость Гималаев и сход холодных воздушных масс объясняет наличие небольших осадков практически весь зимний период, в котором среднее ИВА составляло  $23,7 \text{ кг/м}^2$  (см. рис. 7б). Интенсивность осадков усиливается с 25–26 июня, в это время ИВА достигает  $50\text{--}53 \text{ кг/м}^2$ . Согласно данным ИМД период дождей начался 2–3 июля. Интенсивные дожди заканчиваются 2 сентября по данным ERA5, значения ИВА в этот момент снижаются до  $35 \text{ кг/м}^2$  и менее. Среднее значение ИВА за период дождей равно  $48,3 \text{ кг/м}^2$ . По данным ИМД период дождей заканчивается 15–27 сентября.

**Район 9** с центром в точке  $27,0^{\circ}$  с.ш. и  $78,5^{\circ}$  в.д. расположен юго-восточнее района 8 на суше около предгорья Гималаев на территории Индии. Среднее значение ИВА в весенний период находится на уровне  $24,3 \text{ кг/м}^2$  (рис. 8а), увеличение ИВА начинается с мая, достигая значений больше  $50 \text{ кг/м}^2$ , когда 12 июня наступает период дождей по данным ERA5. Начало муссона по данным ИМД приходится на 21 июня – 1 июля. Среднее значение ИВА за период дождей равно  $50,8 \text{ кг/м}^2$ . Период интенсивных дождей заканчивается 9 октября, в это время ИВА снижается до  $35 \text{ кг/м}^2$ . По данным ИМД период дождей заканчивается 8–13 октября.

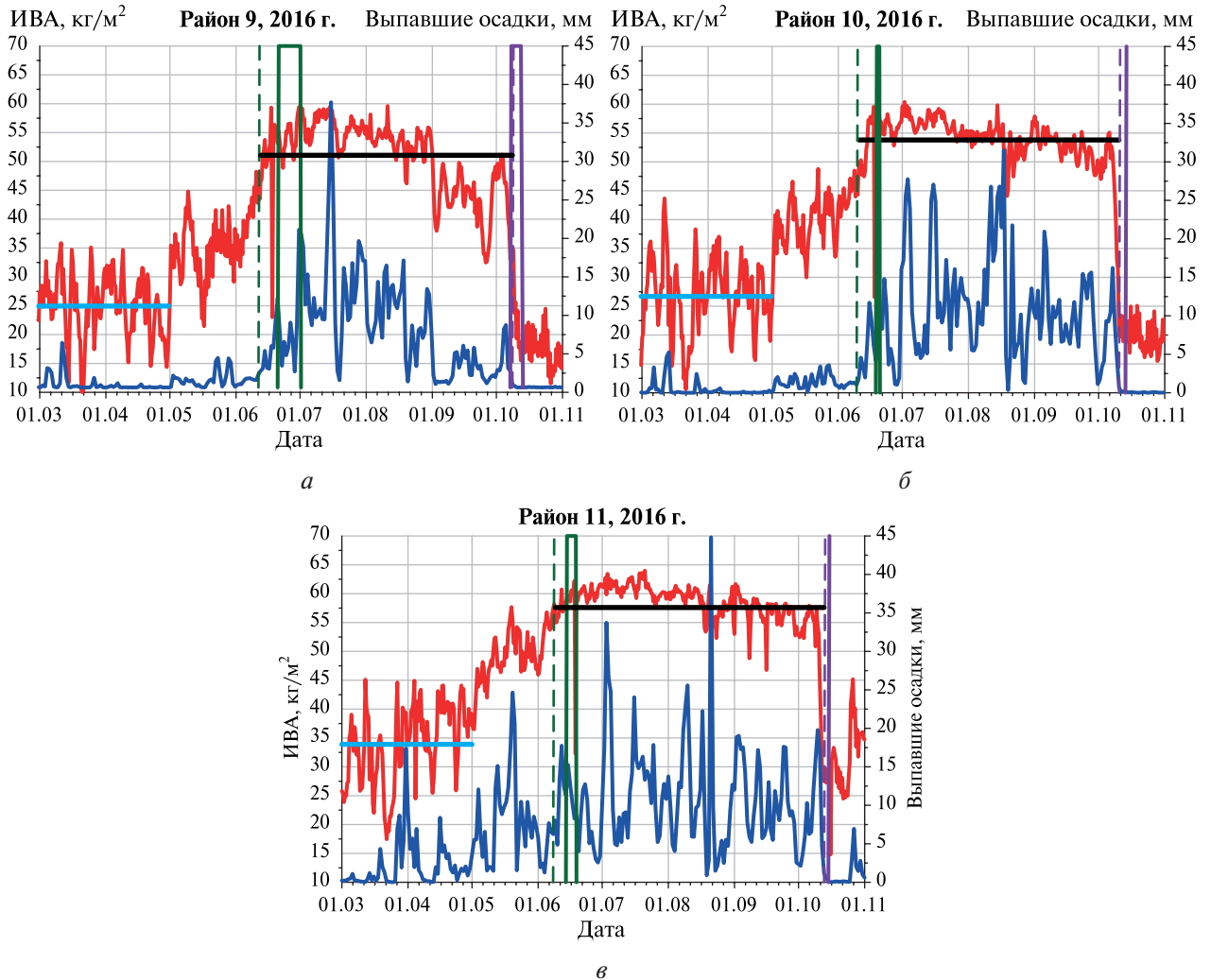


Рис. 8. Данные ИВА (красная кривая) и суточных осадков (по ERA5, синяя кривая) для районов 9 (а), 10 (б) и 11 (в). Зелёные вертикальные линии показывают начало периода муссонов, сиреневые — окончание по данным ИМД; штриховые линии — по осадкам из реанализа ERA5. Голубая прямая демонстрирует средний уровень ИВА за весенний период с 1 марта по 1 мая, чёрная линия — средний уровень за период муссона

**Район 10** с центром в точке  $25,0^{\circ}$  с.ш. и  $83,5^{\circ}$  в.д. находится юго-восточнее района 9 на суше около предгорья Гималаев на территории Индии и вблизи районов 11 и 6, область которых является местом насыщения водяным паром. Средний уровень ИВА в весенний период составляет  $26,7 \text{ кг/м}^2$  (см. рис. 8б). Возрастание ИВА происходит с мая и при достижении  $53,8 \text{ кг/м}^2$  10 июня начинаются интенсивные дожди по данным ERA5. По данным ИМД муссон начался 19–20 июня. Среднее значение ИВА за период дождей равно  $53,8 \text{ кг/м}^2$ . Окончание муссона происходит 11 октября, в это время ИВА резко снижается до  $40\text{--}30 \text{ кг/м}^2$ . По данным ИМД период дождей заканчивается 14 октября.

Район 11 с центром в точке  $24,0^\circ$  с. ш. и  $88,5^\circ$  в. д. находится севернее района 6 и восточнее района 10 на суше около предгорья Гималаев на территории Индии. Эта область является местом насыщения атмосферы водяным паром, что связано с преимущественными юго-восточными ветрами и Гималаями, которые служат естественной преградой дальнейшему движению водяного пара на север. Средний уровень ИВА составляет за весенний период с 1 марта по 1 мая  $33,9 \text{ кг/м}^2$  (см. рис. 8в). Возрастание ИВА происходит с мая и при достижении значений более  $55 \text{ кг/м}^2$  8 июня начинаются интенсивные дожди по данным ERA5. По данным ИМД муссон начался 14–18 июня. Средний уровень ИВА за период муссона составляет  $57,9 \text{ кг/м}^2$ . Окончание муссона происходит 13 октября, в это время ИВА резко снижается до величины  $30 \text{ кг/м}^2$ . По данным ИМД период дождей заканчивается 15 октября.

## Обсуждение результатов

Интегральное влагосодержание атмосферы — качественный и количественный индикатор процессов, происходящих в атмосфере над полуостровом Индостан и прилегающими районами. Так, анализ полей ИВА (см. рис. 1) демонстрирует движение ВЗК с мая по июль с юго-востока на северо-запад, хотя преобладающие ветры в этом регионе в этот период юго-западные. Движение происходит не однородно, а довольно сложным образом, который возмущают текущие синоптические процессы, такие как циклоны и атмосферные реки. Анализ динамики выпавших осадков показывает устойчивую связь с изменениями ИВА, так что последние могут стать индикатором наступления сезона дождей. Во всех исследуемых 11 районах отмечается возрастание ИВА с весенних значений (с 1 марта по 1 мая) до значений во время периода дождей (табл. 4). Следует отметить, что прирост ИВА во всех районах лежит в интервале  $22\text{--}27 \text{ кг/м}^2$ , за исключением четвёртого района, который находится в Индийском океане и ближе всего расположен к ВЗК, а также района 3, где прирост составляет всего  $11,5 \text{ кг/м}^2$ .

Таблица 4. Среднее значение ИВА в весенний период и в период дождей

| № района | Среднее значение ИВА, $\text{кг/м}^2$ |                  | Прирост ИВА, $\text{кг/м}^2$ |
|----------|---------------------------------------|------------------|------------------------------|
|          | в весенний период                     | в период муссона |                              |
| 1        | 27,6                                  | 47,7             | 27,6                         |
| 2        | 28,0                                  | 51,4             | 23,4                         |
| 3        | 39,2                                  | 50,7             | 11,5                         |
| 4        | 46,3                                  | 51,5             | 5,2                          |
| 5        | 30,8                                  | 54,3             | 23,5                         |
| 6        | 31,3                                  | 56,1             | 24,8                         |
| 7        | 23,7                                  | 46,1             | 22,4                         |
| 8        | 23,7                                  | 48,3             | 24,6                         |
| 9        | 24,3                                  | 50,8             | 26,5                         |
| 10       | 26,7                                  | 53,8             | 27,1                         |
| 11       | 33,9                                  | 57,9             | 24,0                         |

Начало выпадения осадков по данным ERA5 часто не совпадает с началом периода муссонов, определённым по версии ИМД. Так, для районов 2–4 существенные осадки начинаются на 20–25 дней раньше, а для остальных районов на 5–7 дней раньше, чем по версии ИМД. Окончание периода муссонов чётко отслеживается для районов 1–2 и 7–11, когда ИВА снижается с  $55\text{--}45$  до  $35\text{--}25 \text{ кг/м}^2$ . Для районов 3–6 определить окончание муссона не представляется возможным, так как дожди не прекращаются до 1 ноября и высокий уровень значений ИВА сохраняется.

Возрастание ИВА с 1 марта перед приходом муссона, выход на условно постоянные значения, плато, и резкое снижение с окончанием периода дождей могут служить некоторым шаблоном для прогноза начала и окончания муссона в каждом районе. Во второй части статьи мы проведём построение среднего шаблона для каждого района по данным ИВА за 2012–2021 гг.

## Выводы

В первой части работы проведён анализ интегрального влагосодержания атмосферы в летний период индийского муссона за 2012–2021 гг. Для получения ИВА используются микроволновые радиометрические данные SSMIS спутников F16–F18. По этим данным в ИКИ РАН была создана база глобальных ежедневных полей ИВА за период с 2012 по 2023 г. В восстановлении ИВА из данных SSMIS использовалась технология искусственных нейронных сетей и методика подхода спутникового радиотепловидения. Таким образом были получены ежесуточные поля ИВА за 2012–2021 гг. по радиометрическим данным SSMIS F16–F18 каналов 1–18 с интервалом 3 ч на координатной сетке  $0,25 \times 0,25^\circ$ .

Для исследования выделены 11 районов для анализа ИВА вокруг полуострова Индостан. Каждый район был выбран размером  $5 \times 5^\circ$ . Шесть из этих районов находятся над акваториями Аравийского моря, Бенгальского залива и Индийского океана, а пять — расположены над сушей и относятся к северо-западу Индии, границе Индии с Пакистаном и к северным областям вдоль Гималаев. Для примера приведены и проанализированы данные ИВА за 2016 г. Эти данные сравниваются с данными выпавших за сутки осадков, взятых по реанализу ERA5.

В работе показано, что поле ИВА во всех рассмотренных областях над Индостаном и прилегающими акваториями Индийского океана меняется на сезонных масштабах сходным образом: фаза наиболее низких зимних значений сменяется ростом с примерно постоянной, незначительно различающейся для каждого региона скоростью и выходом на плато максимальных значений, примерно совпадающим с моментом начала муссонных осадков в регионе. Такое закономерное изменение значений ИВА на больших пространственно-временных масштабах позволяет предположить, что его поведение практически полностью определяется одним фактором: внутригодовой миграцией ВЗК от термического экватора в более высокие широты. Авторы принимают рабочую гипотезу о том, что прогноз начала муссонных осадков в каждом из рассматриваемых регионов можно осуществлять, рассматривая смещение ВЗК как «набегающую волну» высоких значений ИВА и определяя начало и скорость этой волны по характерному нарастанию ИВА в текущем году, проводя сопоставление текущих значений со среднемноголетними и/или ориентируясь на предысторию эволюции ИВА в регионах, где муссонные явления наступают раньше (над океаном, в прибрежных областях, в глубине субконтинента). Собранные и обобщённые статистика крупномасштабной эволюции ИВА в выделенных регионах будет использована в следующей работе для исследования принципиальной возможности разработки конкретных подходов к такому сопоставлению. Следует отметить, что такой подход в перспективе можно применить к любым крупным регионам в пределах полуострова Индостан, в отличие от методики ИМД, дающей прогноз только для одного штата Керала.

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

## Литература

1. *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.
2. *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.
3. *Кузьмин А. В., Ермаков Д. М., Суровяткина Е. Д. и др.* Исследование летнего индийского муссона в поле интегрального влагосодержания атмосферы по данным спутниковых микроволновых радиометров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 3. С. 292–306. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-292-306.
4. *Кутуза Б. Г., Данилычев М. В., Яковлев О. И.* Спутниковый мониторинг Земли: микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. М.: Ленанд, 2016. 336 с.
5. *Шарков Е. А.* Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: физические основы: в 2 т. Т. 1. М.: ИКИ РАН, 2014. 544 с.
6. *Ermakov D.* Satellite radiothermvision of atmospheric processes: Method and applications. Cham: Springer, 2021. 199 p. DOI: 10.1007/978-3-030-57085-9.
7. *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. pp. 1009–1020. DOI: 10.1175/JCLI-D-21-0063.1.
8. *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. V. 46. P. 863–883. DOI: 10.1109/tgrs.2008.917980.
9. *Ludescher J., Martin M., Boers N. et al.* Network-based forecasting of climate phenomena // PNAS. 2021. V. 118. No. 47. Article e1922872118. DOI: 10.1073/pnas.1922872118.
10. *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. DOI: 10.1002/2016GL068392.

## A study of the summer monsoon near the Hindustan Peninsula in the atmospheric precipitable water vapor field based on satellite microwave radiometer data: Part 1

**A. V. Kuzmin<sup>1</sup>, D. M. Ermakov<sup>1,2</sup>, A. G. Golovko<sup>1</sup>**

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

<sup>2</sup> *Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Fryazino Branch  
Fryazino, Moscow Region 141190, Russia  
E-mail: dima@ire.rssi.ru*

The paper presents an analysis of daily precipitable water vapor (PWV) in the summer period of the Indian monsoon for 2012–2021. To obtain PWV, microwave radiometric SSMIS data from the F16–F18 satellites were used. From these data, a database of global daily PWV fields for the period from 2012 to 2023 was created at Space Research Institute RAS. In reconstructing PWV from the SSMIS data, the artificial neural network technology and the satellite radiothermvision approach were used. Thus, daily PWV fields for 2012–2021 were obtained from the radiometric data of F16–F18 SSMIS channels 1–18 with an interval of 3 hours on a coordinate grid of  $0.25 \times 0.25^\circ$ . In the first part of the article, 11 regions around the Hindustan Peninsula are studied. Each region is selected with a size of  $5 \times 5^\circ$ . Six of these areas are located over the Arabian Sea, the Bay of Bengal and the Indian Ocean, and five areas are located on land — in northwest India, at the border with Pakistan and in the north along the Himalayas. As an example, the PWV data for 2016 are presented and analyzed. These PWV data are compared with the total precipitation data taken from the ERA5 reanalysis.

The studies have shown that in all the analyzed areas there is a high correlation between the dynamics of the total precipitation and the PWV values. An increase in the PWV occurs before the rainy season from about March until the onset of the monsoon, then the PWV reaches a relatively constant value, a “plateau”, and intense rainfall occurs during this period. Then there is a sharp decrease in the PWV with the end of the rainy season. This consistent change in the PWV can serve as a template for the forecast of the beginning and end of the monsoon in each region. In the second part of the article, we will construct an average template for each region based on the PWV data for 2012–2021.

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

The work was carried out within the framework of the State Assignments of IKI RAS (Monitoring, registration No. 122042500031-8) in part of thematic processing and analysis of data and IRE RAS (Kosmos-2, state registration No. 0030-2019-0008) in part of application to processing of interpolation algorithms for eliminating data gaps.

Accepted: 13.11.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-365-379

## References

1. 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, V. 54, No. 9, pp. 1223–1243, DOI: 10.1134/S000143381809013X.
2. 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, No. 72, pp. 470–492 (in Russian), DOI: 10.33933/2713-3001-2023-72-470-492.
3. Kuzmin A. V., Ermakov D. M., Surovyatkina E. D. et al., Study of the Indian summer monsoon in the precipitable water vapor field of the atmosphere based on satellite microwave radiometers data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21. No. 3, pp. 292–306 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-292-306.
4. 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).
5. Sharkov E. A., *Passive microwave remote sensing of the Earth: Physical foundations*, Berlin: Springer/PRAXIS, 2003, 613 p.
6. Ermakov D., *Satellite radiothermvision of atmospheric processes: Method and applications*, Cham: Springer, 2021, 199 p., DOI: 10.1007/978-3-030-57085-9.
7. 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, pp. 1009–1020, DOI: 10.1175/JCLI-D-21-0063.1.
8. Kunke 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, pp. 863–883, DOI: 10.1109/tgrs.2008.917980.
9. Ludescher J., Martin M., Boers N. et al., Network-based forecasting of climate phenomena, *PNAS*, 2021, V. 118, No. 47, Article e1922872118, DOI: 10.1073/pnas.1922872118.
10. 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, pp. 3982–3990, DOI: 10.1002/2016GL068392.