Исследование летнего муссона близ полуострова Индостан в поле интегрального влагосодержания атмосферы по данным спутниковых микроволновых радиометров. Часть 2

А. В. Кузьмин [1], Д. М. Ермаков [1, 2], А. Г. Головко [1], Р. Д. Коняшов [1]

[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, Московская обл., 141190, Россия*
E-mail: d.m.ermakov@cosmos.ru

В первой части нашей статьи, опубликованной в 2025 г., было показано, что поле интегрального влагосодержания атмосферы (ИВА), определённого по данным микроволновых радиометрических сенсоров SSMIS (*англ.* Special Sensor Microwave Imager/Sounder) спутников F16–F18, во всех рассмотренных областях над Индостаном и прилегающими акваториями Индийского океана меняется на сезонных масштабах сходным образом: фаза наиболее низких зимних значений сменяется ростом примерно с постоянной, незначительно различающейся для каждого региона скоростью и выходом на плато максимальных значений, примерно совпадающим с моментом начала муссонных осадков в регионе. В данной работе были построены средние временные зависимости ИВА (шаблоны) для каждого из 11 выделенных районов вблизи полуострова Индостан. Для этого была использована итерационная схема усреднения годовых временных последовательностей ИВА каждого района со сдвигом по времени (выравниванием). Критерием остановки итерационной схемы было достижение максимальной корреляции между шаблоном и соответствующими временными рядами ИВА за все годы. Реализация этой схемы преследовала двойную цель. Во-первых, подтвердить, что крупномасштабные особенности временного хода ИВА в каждом регионе воспроизводятся год от года с высокой степенью подобия, а межгодовая изменчивость проявляется в основном в относительном сдвиге календарных дат начала роста ИВА в каждом из районов. Во-вторых, получить сам шаблон для каждого района, т.е. усреднённую картину временного хода ИВА, имеющую максимальную корреляцию с данными за каждый рассмотренный год. Полученные шаблоны ИВА действительно имели высокую корреляцию с данными ИВА по каждому году (в основном более 0,85). Это подтверждает первоначально выдвинутую гипотезу о том, что временной ход ИВА в рассмотренных районах практически полностью определяется внутригодовой миграцией внутритропической зоны конвергенции. Такое закономерное изменение значений ИВА позволяет предложить использование построенных шаблонов для исследования принципиальной возможности разработки конкретных подходов к прогнозированию даты начала муссона. Перспективным представляется расширение этого подхода на всю территорию полуострова Индостан посредством разбиения её на районы одинаковых размеров.

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

Одобрена к печати: 06.07.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-4-417-431

Введение

В первой части нашей статьи (Кузьмин и др., 2025) было показано, что поле интегрального влагосодержания атмосферы (ИВА), определённого по данным микроволновых радиометрических сенсоров SSMIS (*англ.* Special Sensor Microwave Imager/Sounder) спутников F16–F18, во всех рассмотренных областях над Индостаном и прилегающими акваториями Индийского океана меняется на сезонных масштабах сходным образом: фаза наиболее низких зимних значений сменяется ростом примерно с 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 ИВА

на больших пространственно-временных масштабах позволяет предположить, что его поведение практически полностью определяется главным фактором: внутригодовой миграцией внутритропической зоны конвергенции (ВЗК) от термического экватора в более высокие широты.

Были выделены 11 районов для анализа ИВА вокруг полуострова Индостан (*рис. 1*). Каждый район выбран размером 5×5°. Шесть из этих районов находятся над акваториями Аравийского моря, Бенгальского залива и Индийского океана, а пять районов расположены над сушей и относятся к северо-западу Индии, границе Индии с Пакистаном и к северным областям вдоль Гималаев. Для примера в первой части работы были приведены и проанализированы данные ИВА за 2016 г., которые сопоставлялись с данными о выпавших за сутки осадках, взятыми по реанализу ECMWF ERA5 (*англ.* European Centre of Medium-range Weather Forecasts Reanalysis v.5) за 2025 г. (Hersbach et al., 2025).

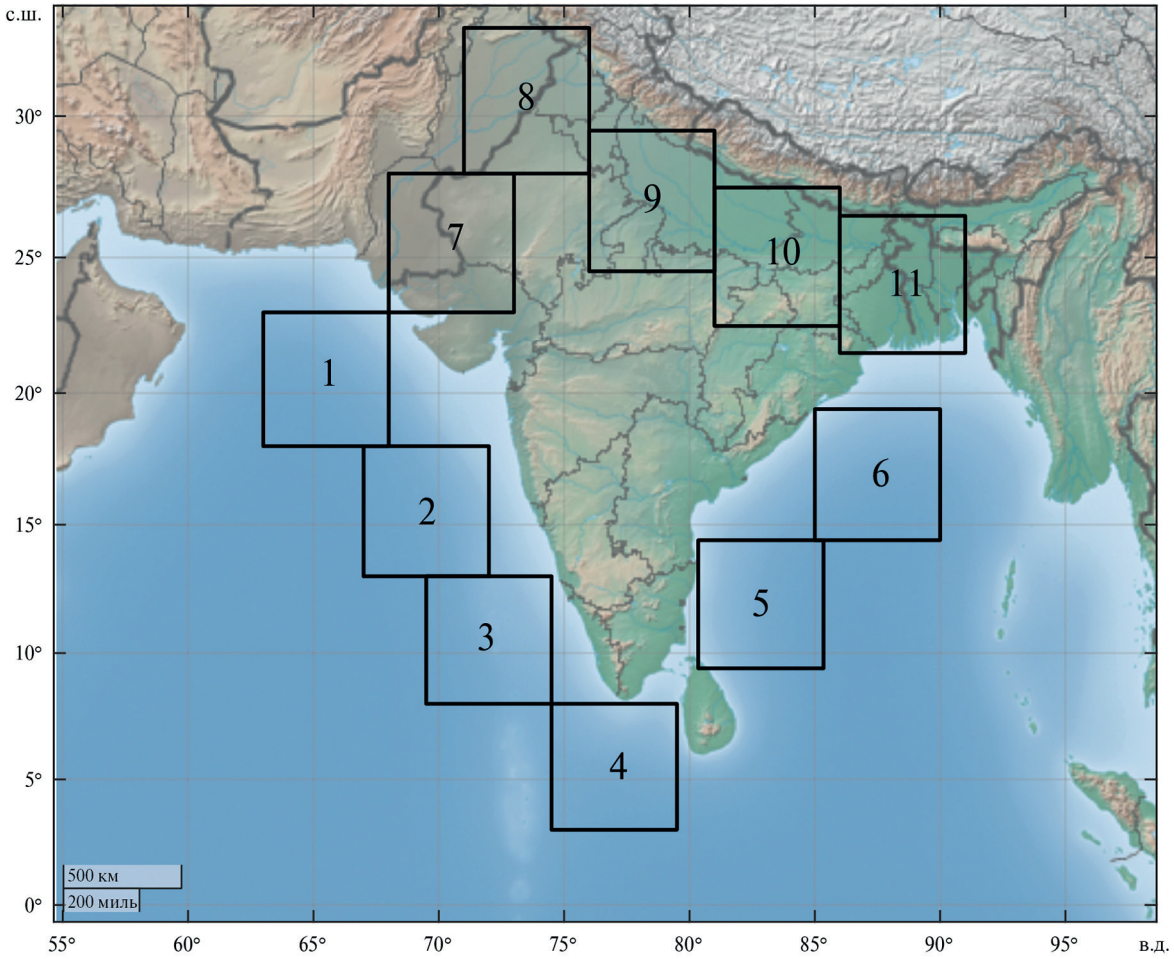


Рис. 1. Выбранные районы исследований в области полуострова Индостан

В настоящей работе проанализирована собранная и обобщённая статистика крупномасштабной эволюции ИВА в выделенных районах за 2012–2021 гг. Построены средние временные зависимости ИВА (шаблоны) по каждому району для исследования принципиальной возможности разработки конкретных подходов к прогнозированию даты начала муссона. Следует отметить, что такой подход в перспективе можно будет расширить на любые крупные районы в пределах полуострова Индостан, в отличие от методики Индийского метеорологического департамента (ИМД) (*англ.* India Meteorological Depertament), дающей прогноз только для одного штата Керала (https://mausam.imd.gov.in/responsive/monsooninformation_onset.php).

Обоснование введения шаблона

Выявленная в первой части нашей статьи (Кузьмин и др., 2025) циклическая закономерность поведения поля ИВА в областях над Индостаном и прилегающими акваториями Индийского океана, связанная с годовым движением ВЗК, дала основания для дальнейшего более детального изучения этого явления в контексте возможности прогноза характеристик муссона наряду с другими развиваемыми подходами (Кузьмин и др., 2024; Fan et al., 2022; Ludescher et al., 2021; Stolbova et al., 2016).

Для пояснения смысла процедуры построения шаблона и перспективы его дальнейшего использования при прогнозе начала муссонных осадков необходимо кратко повторить основные положения, принятые нами в качестве рабочей гипотезы и подтверждённые в этом исследовании. Гипотеза состояла в том, что временной ход ИВА над каждым из рассмотренных районов воспроизводится год от года без существенных изменений своих крупномасштабных особенностей (зимний низкий уровень ИВА; быстрый рост ИВА, вызванный смещением ВЗК на север; плато высоких летних значений ИВА). При этом начало муссонных осадков оказывается приуроченным к выходу ИВА на летнее плато, когда атмосфера подготовлена к почти непрерывной генерации осадков за счёт вовлечения новых насыщенных влагой воздушных масс. Триггером запуска осадкообразования может быть как внешний фактор (холодное вторжение, проход циклона), так и развитие неоднородностей в самой среде. Прекращение муссонных осадков связано с возвращением ВЗК к экватору и уменьшением содержания водяного пара в атмосфере.

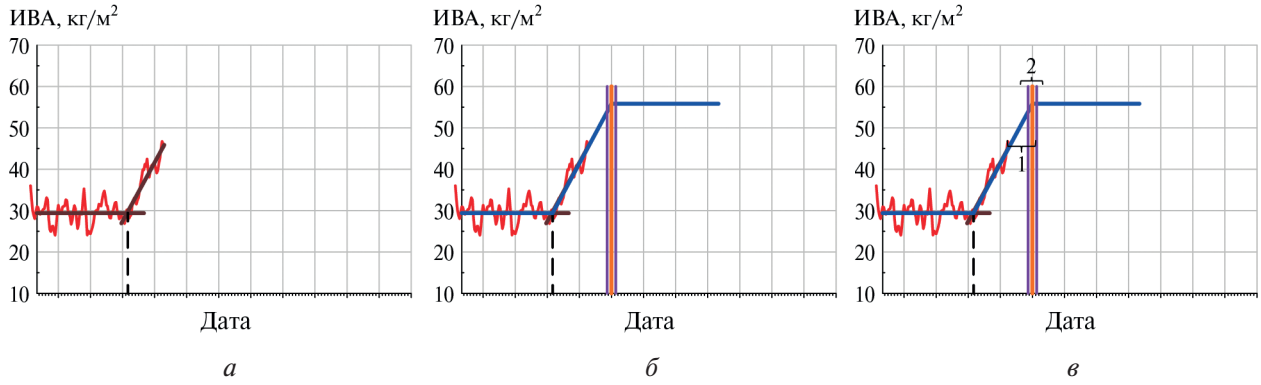


Рис. 2. Схема построения прогноза начала муссонных осадков: *а* — определение даты начала сезонного возрастания ИВА (красная линия — измерения ИВА в текущем году; коричневая — аппроксимация фаз холодного и переходного сезонов; чёрная штриховая — момент начала роста ИВА); *б* — совмещение шаблона (синяя линия) с текущими измерениями по дате начала роста ИВА; вертикальные линии — даты начала муссонных осадков за разные годы, привязанные к шаблону; *в* — прогноз начала муссонных осадков в текущем году (оранжевая линия) как средней даты начала муссонных осадков в предыдущие годы; фигурная скобка «1» иллюстрирует заблаговременность прогноза, фигурная скобка «2» — априорную оценку точности прогноза

В рамках этой гипотезы различия календарных дат начала муссонных осадков над фиксированным районом в разные годы объясняется межгодовыми вариациями крупномасштабной атмосферной циркуляции, определяющей начало фазы нарастания и выхода на максимум значений ИВА, вследствие миграции ВЗК. Таким образом, исследование сосредоточено на двух аспектах. Первый заключается в том, чтобы продемонстрировать близкий тождественному временной годовой ход ИВА над каждым районом с учётом возможных относительных взаимных сдвигов вперёд/назад по времени. Этот предполагаемый циклический годовой ход ИВА, со своими особенностями для каждого района, и назван «шаблоном». Процессы синоптического масштаба неизбежно вносят случайные возмущения в реальный временной ход ИВА, вследствие чего построение шаблона затруднено. Тем не менее в работе

описана и реализована итерационная процедура, позволяющая выполнить расчёт шаблона для каждого района и одновременно подтвердить состоятельность гипотезы о его существовании вычислением корреляции полученных шаблонов с временным ходом ИВА за все рассмотренные годы наблюдений по всем районам.

Второй аспект касается связи начала муссонных осадков с выходом ИВА на плато высоких значений. От жёсткости этой связи зависит точность и заблаговременность прогноза начала муссонных осадков по временному ходу ИВА. Действительно, в предположении, что этот временной ход описывается шаблоном для данного района, существует возможность определения в фазе сезонного роста ИВА начала этого роста и — с помощью шаблона для данного района — момента выхода на плато. В этом случае точность прогноза определяется межгодовой изменчивостью временного интервала между выходом ИВА на плато и началом муссонных осадков, а заблаговременность — возможностью надёжно определить момент выхода на плато в некоторый момент фазы роста ИВА (*рис. 2*).

Построение шаблона

Для анализа всей совокупности полученных данных ИВА и построения шаблонов по каждому из районов (см. *рис. 1*) была предложена итерационная схема усреднения годичных временных рядов ИВА с взаимным сдвигом по времени, учитывающим межгодовую изменчивость крупномасштабной атмосферной циркуляции. Критерием оптимальности этих сдвигов стало достижение максимальной корреляции всех годичных временных рядов ИВА с результирующим шаблоном. Следует отметить, что при сдвиге данных по любому из годов шаблон должен быть пересчитан, именно поэтому процедура носит итерационный характер. Было установлено эмпирически для всех рассмотренных районов, что процедура сходится к устойчивому решению при высоких итоговых коэффициентах корреляции. Ниже описана алгоритмическая реализация применённой схемы.

Рассмотрим реализацию схемы построения шаблона на примере одного (любого) района, поскольку для всех районов она выполнялась одинаково и независимо. В качестве первого приближения были выбраны такие взаимные временные сдвиги, при которых совмещались даты начала муссонных осадков, определённые по описанному ранее критерию (Кузьмин и др., 2025). Следует отметить, что вследствие временных сдвигов привязка к абсолютной временной дате теряет смысл, поэтому условно было принято, что точка совмещения временных рядов t_0 имеет номер суток 150, а сами временные ряды рассматриваются в диапазоне от суток номер 0 (на 150 сут ранее точки совмещения t_0) до суток номер 350 (на 200 сут позднее точки совмещения t_0). Таким образом, в первом приближении датам начала муссонных осадков в каждом году был присвоен номер $t_0 = 150$, относительно которого получали фрагменты годичных временных рядов из 351 сут. Напомним, что даты начала периода дождей были определены нами по средним значениям выпавших осадков из данных реанализа ERA5 за 2025 г. и средним ИВА. Определение даты 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.

Следует заметить, что сформулированные правила введены нами достаточно произвольно и в дальнейшем могут потребовать уточнения, что, однако, никак не сказывается на схеме и результате построения шаблонов. Начало муссона часто затруднительно определить в районах, расположенных над морской поверхностью южнее: районы 3, 4, 5, где осадки происходят регулярно до начала периода дождей.

В *табл. 1* представлены даты, определённые нами ранее как начало выпадения муссонных осадков. Поскольку районы различаются географическим расположением, даты начала муссона также варьируются. Так, например, регион 4 находится ближе всего к экватору,

и ВЗК туда приходит раньше. В последней колонке под названием Max Δ дана максимальная разница количества дней между самым ранним наступлением муссона и самым поздним в данном районе. В среднем эта разница составляет 20–50 дней, за исключением района 6 с разницей 13 дней.

Таблица 1. Даты начала муссонных осадков по годам в рассмотренных районах

Район	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	Max Δ
1	01.07	01.06	01.07	06.06	19.06	25.06	28.06	26.06	12.06	08.07	37
2	02.06	25.05	05.06	02.06	23.05	29.05	27.05	18.06	28.05	26.05	29
3	29.05	22.05	28.05	27.05	15.05	06.05	05.05	24.05	26.05	12.04	47
4	17.05	25.04	19.04	05.05	05.05	06.05	25.04	18.05	26.05	07.04	56
5	10.06	26.05	23.05	28.05	03.06	21.05	05.05	17.06	01.06	02.06	49
6	07.06	25.05	05.06	02.06	01.06	25.05	25.05	05.06	02.06	25.05	13
7	08.07	02.07	15.07	16.06	24.06	26.06	26.06	21.07	04.07	02.06	49
8	03.07	25.06	29.06	19.06	25.06	17.06	25.06	05.07	23.06	09.07	22
9	02.07	08.06	01.07	20.06	12.06	19.06	24.06	01.07	21.06	08.06	24
10	02.07	27.05	13.06	10.06	10.06	15.06	21.06	19.06	10.06	05.06	36
11	13.06	03.05	23.05	09.06	08.06	25.05	28.05	20.06	10.06	29.04	52

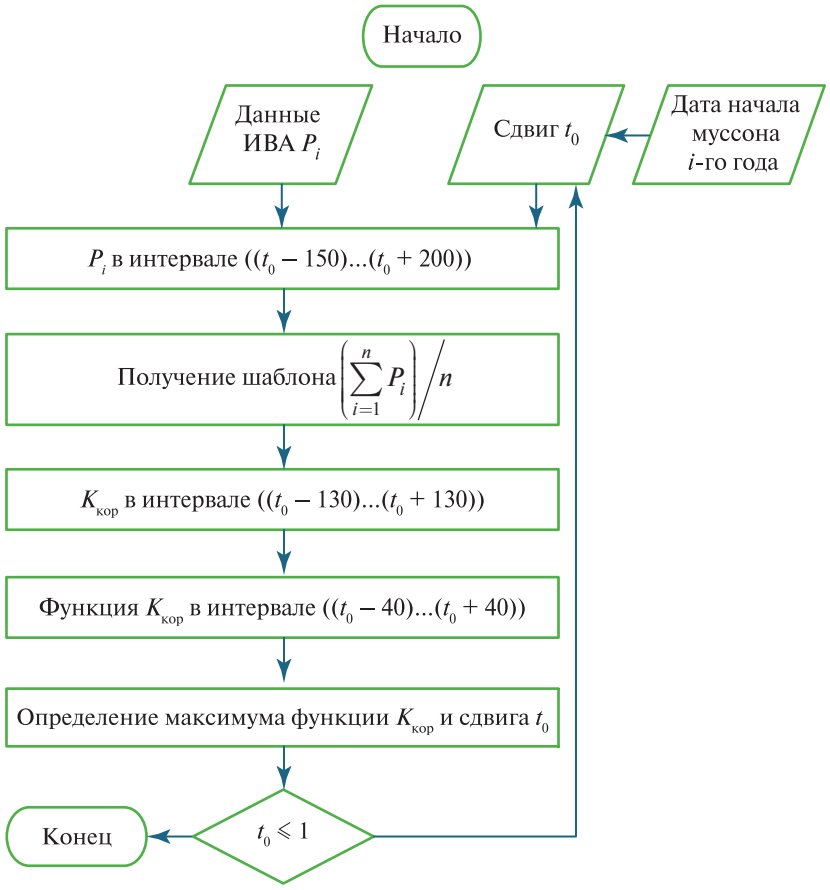


Рис. 3. Блок-схема вычисления шаблона для каждого района. P_i — временная зависимость ИВА данного района за i-й год, n — количество лет, по которым вычисляется шаблон, $K_{кор}$ — коэффициент корреляции между шаблоном и временными рядами ИВА за каждый год

Назначая даты начала муссонных осадков сутками номер $t_0 = 150$ за соответствующие годы, выполняли совмещение фрагментов временных рядов ИВА и расчёт шаблона в первом приближении. Затем вычисляли взаимные корреляционные функции между шаблоном и временными рядами за каждый из годов. Находили максимумы взаимных корреляционных функций на отрезке ±40 сут относительно точки совмещения t_0 и получали поправки к оптимальным временным смещениям рядов за каждый год. Этот итерационный процесс прекращался, когда положение максимума корреляционной функции для каждого года отличалось от предыдущего положения не более чем на сутки. Полученное на последнем шаге приближение шаблона считалось окончательным. На *рис. 3* представлена блок-схема вычисления шаблона для каждого района.

При построении шаблонов исключены данные 2012 и 2021 гг. Данные 2012 г. были граничными в исследованиях и при вычислении корреляционной функции выходили за допустимые пределы (коэффициент корреляции рассчитывался в интервале ±130 точек от точки t_0, а функция корреляции ещё считалась в интервале ±40 точек, что суммарно определяло начало интервала расчёта — 170 точек или дней (5,5 мес.) от точки t_0, таким образом, при вычислении функции корреляции данные заходили на 2011 г., информации о котором у нас не было). В данных за 2021 г., начиная с середины июля, наблюдались регулярные пропуски исходных измерений, что не позволило адекватно рассчитать ИВА.

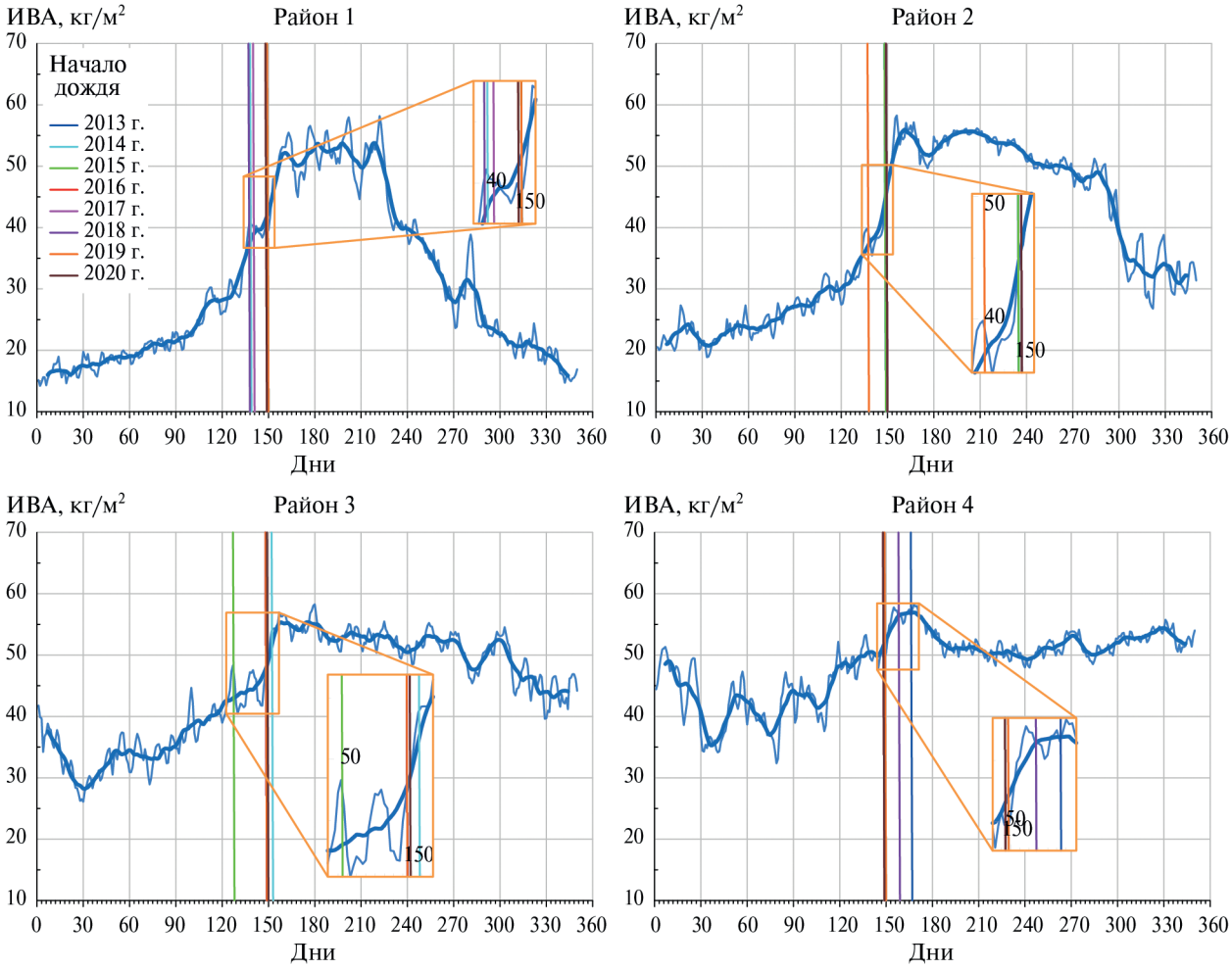


Рис. 4. Шаблоны ИВА (тонкая голубая линия) для районов 1–4, полученные усреднением данных за 2013–2020 гг., и результат их сглаживания в окне 13 сут (толстая линия); вертикальными линиями показаны положения условных дат начала муссонных осадков

Полученные шаблоны

По описанной выше процедуре были построены шаблоны для всех 11 районов. На *рис. 4* показаны шаблоны ИВА для районов 1–4, полученные усреднением данных за 2013–2020 гг. Вертикальными линиями на графике отмечены условные даты начала муссонных осадков за все годы, сместившиеся относительно общего начального положения ($t_0 = 150$) в результате введения оптимальных временных сдвигов. На *рис. 5* и *6* приведены шаблоны для районов 5–11.

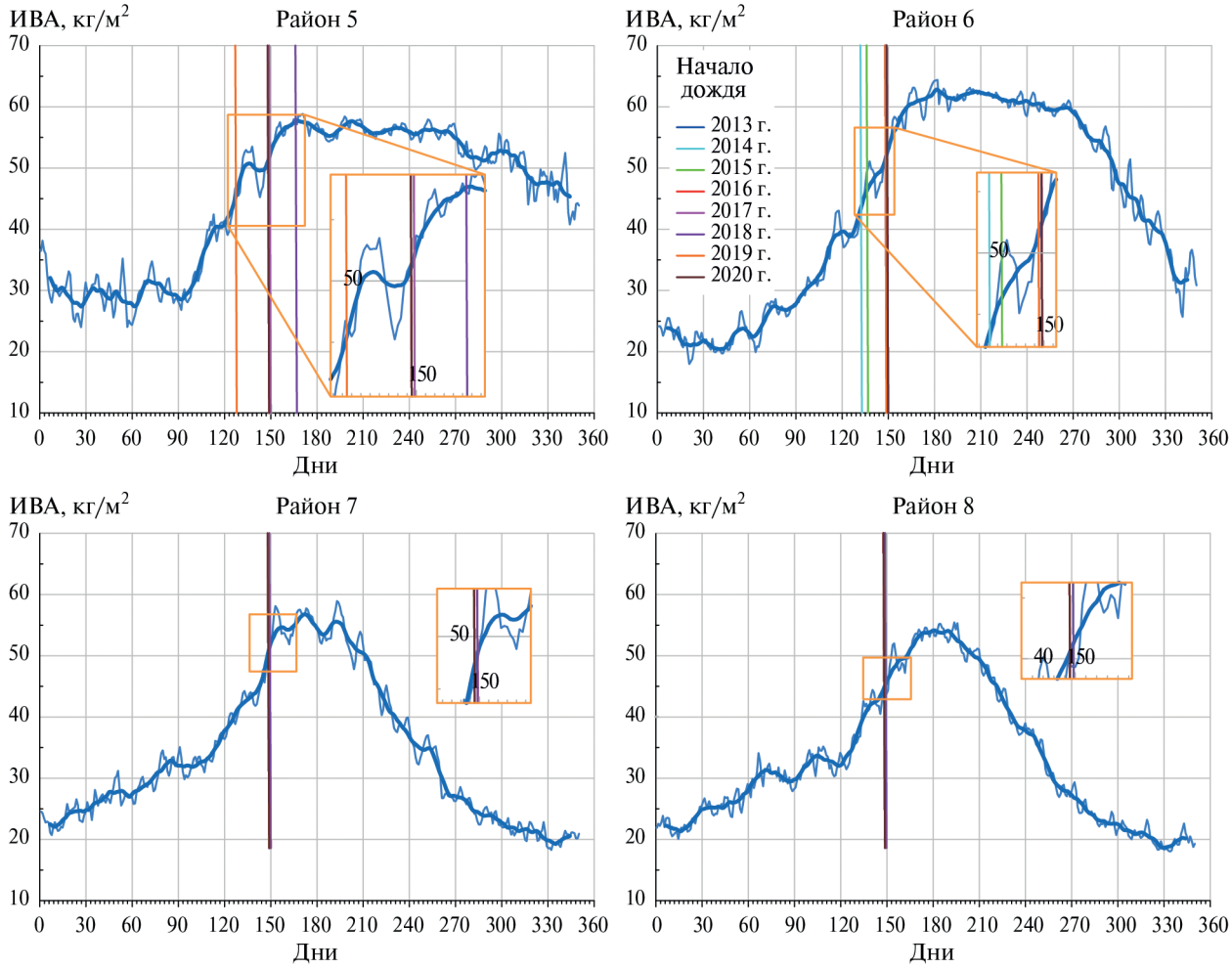


Рис. 5. Шаблоны ИВА (тонкая голубая линия) для районов 5–8, полученные усреднением данных за 2013–2020 гг., и результат их сглаживания в окне 13 сут. (толстая линия); вертикальными линиями показаны положения условных дат начала муссонных осадков

В *табл. 2* представлены коэффициенты корреляции между итоговым шаблоном района и данными соответствующих лет, по которым вычислялся шаблон. Минимальный коэффициент корреляции от 0,63 до 0,79 наблюдается в районе 4, который расположен в Индийском океане у южной оконечности Индии и который ближе всего находится к среднегодовому положению оси ВЗК. Для граничащего с ним с севера районом 3 значения коэффициента корреляции составляют от 0,82 до 0,92. В остальных районах коэффициент корреляции довольно высокий: от 0,85 до 0,98, причём существенно чаще наблюдаются значения не ниже 0,90.

Была проверена чувствительность шаблона к исключению произвольного года из расчётов. Эти вычисления показали, что суммарные шаблоны для каждого района сохраняют свою форму, хотя немного меняется шумовая составляющая, при этом корреляция годовых

образцов ИВА для каждого района не меняется. Так, исключение 2020 г. из расчёта шаблонов по районам снизило суммарную корреляцию по всем рассматриваемым годам и районам с 0,91 до 0,90.

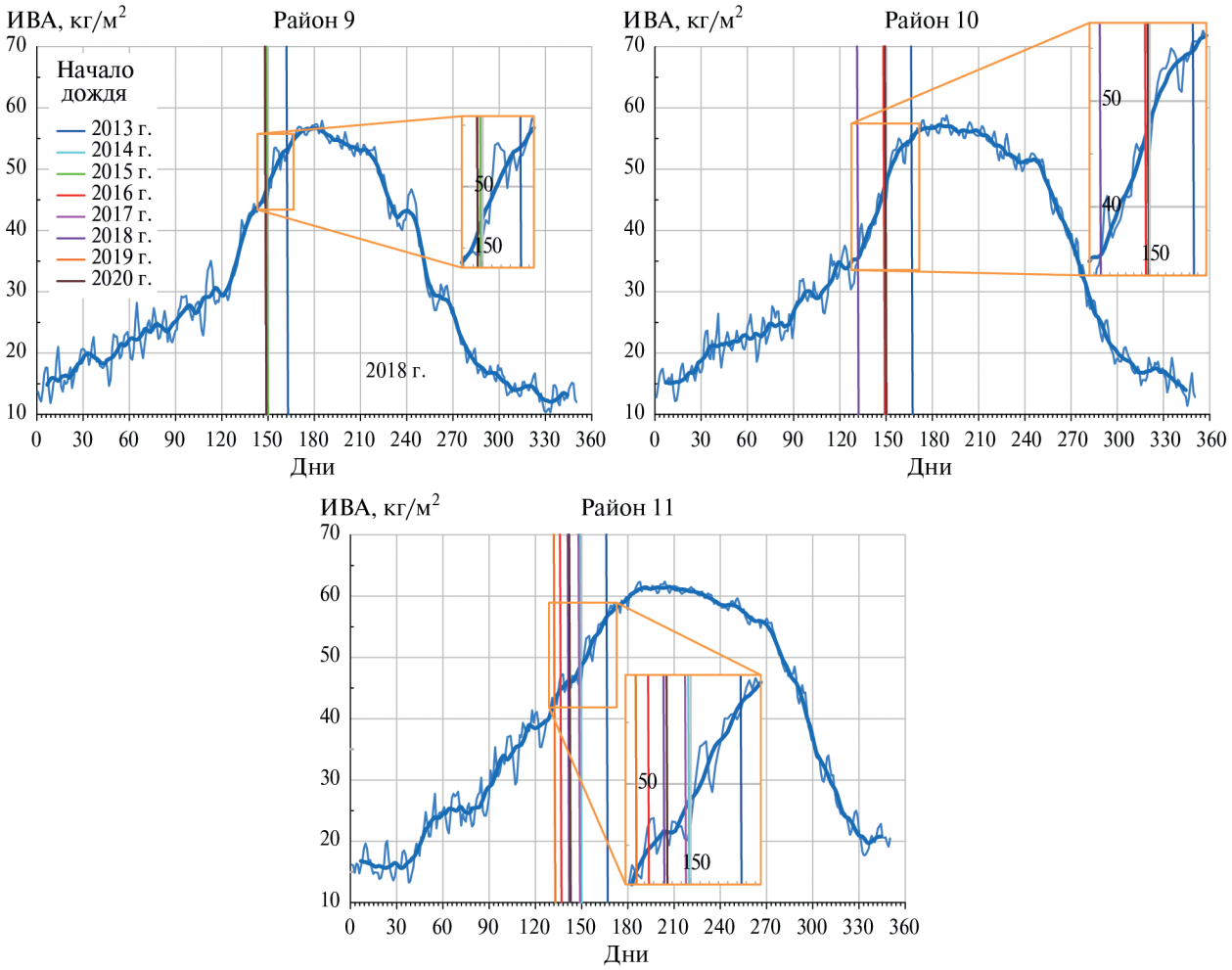


Рис. 6. Шаблоны ИВА (тонкая голубая линия) для районов 9–11, полученные усреднением данных за 2013–2020 гг., и результат их сглаживания в окне 13 сут. (толстая линия); вертикальными линиями показаны положения условных дат начала муссонных осадков

Таблица 2. Корреляция шаблонов ИВА с данными за отдельные годы по 11 районам

Район	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.
1	0,92	0,90	0,87	0,86	0,92	0,92	0,91	0,95
2	0,95	0,94	0,90	0,92	0,96	0,94	0,97	0,96
3	0,84	0,82	0,89	0,84	0,92	0,88	0,90	0,92
4	0,67	0,64	0,79	0,63	0,73	0,72	0,76	0,77
5	0,90	0,95	0,91	0,94	0,89	0,93	0,92	0,96
6	0,97	0,97	0,97	0,97	0,98	0,98	0,97	0,96
7	0,90	0,85	0,86	0,89	0,93	0,92	0,88	0,92
8	0,90	0,89	0,89	0,90	0,91	0,94	0,94	0,91
9	0,93	0,89	0,91	0,91	0,95	0,95	0,95	0,94
10	0,93	0,92	0,92	0,92	0,95	0,96	0,95	0,96
11	0,97	0,96	0,96	0,97	0,97	0,98	0,97	0,97

0,63–0,67
0,68–0,72
0,73–0,77
0,78–0,82
0,83–0,87
0,88–0,92
0,93–0,98

Анализ результатов

Представленные выше результаты (*табл. 2* и см. *рис. 4–6*) подтверждают первую рабочую гипотезу исследования: временной ход ИВА над каждым из рассмотренных районов воспроизводится год от года без существенных изменений своих крупномасштабных особенностей, но со сдвигами по времени, определяемыми межгодовыми вариациями региональной атмосферной циркуляции. Поэтому ключевой интерес представляет второй вопрос: насколько тесно сгруппированы даты начала муссонных осадков за разные годы относительно некоторой точки на временной шкале итогового шаблона. В *табл. 3* представлено отклонение предполагаемой даты начала муссонных осадков (см. *табл. 1*) по годам в каждом районе относительно точки t_0 по временной шкале шаблонов соответствующих районов с учётом введённых временных сдвигов. Положительное значение отклонения означает, что дата начала муссона смещается на более позднюю дату, а отрицательное — на более раннюю.

Отметим, что минимальные абсолютные величины отклонения наблюдаются в районах 7 и 8, которые находятся на суше в северо-западной части полуострова Индостан, а максимальное (в среднем) отклонение — в 11-м районе в восточной части предгорий Гималаев около района 6 в Бискайском заливе.

Таблица 3. Отклонение предполагаемой даты начала муссонных осадков (см. *табл. 1*) по годам в каждом районе относительно точки t_0

Район	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	Среднее значение	Стандартное отклонение
1	0	−11	0	−1	−5	−9	0	−1	−3,38	4,44
2	−1	−1	−1	−1	0	−1	−12	0	−2,13	4,02
3	−1	3	−21	−1	0	−1	−1	0	−2,75	7,50
4	17	0	−1	−1	−1	9	0	−1	2,75	6,69
5	−1	0	0	0	0	17	−23	−1	−1,00	10,77
6	0	−16	−13	0	0	0	−1	−1	−3,88	6,62
7	−1	−1	−1	0	0	0	−1	−1	−0,63	0,52
8	0	−1	0	−1	−1	0	−1	−1	−0,63	0,52
9	13	−1	0	0	−1	−1	−1	−1	1,00	4,87
10	17	−1	0	−1	0	−18	0	0	−0,38	9,36
11	17	0	−17	−13	−1	−8	−17	−7	−5,75	11,25

Предварительный анализ показывает, что в ряде районов (особенно в 7-м и 8-м) прогноз начала муссонных осадков по предложенной выше схеме имеет хорошие перспективы реализации и может обеспечивать точность вплоть до 1 сут. В то же время есть ряд районов (например, 2, 3, 4, 9, 10-й), где среднеквадратичное отклонение даты начала осадков от единой точки t_0 оказывается высоким за счёт единичных выбросов в конкретные годы, в то время как в остальные годы отклонение в основном не превышает 1 сут. Поскольку, как указано ранее, правило выбора даты начала муссонных осадков было в достаточной степени произвольным, более глубокого изучения заслуживает вопрос, связаны ли наблюдаемые выбросы с особенностями развития синоптической ситуации в отдельные годы или с артефактами ранее применённой методики.

Были проанализированы все случаи большого (более 10 сут) по абсолютному значению отклонения (выделены в *табл. 3* жёлтым цветом). На *рис. 7* и *8* в качестве примеров показаны графики ИВА по спутниковым данным и суточных осадков по данным реанализа ERA5 для некоторых районов и лет, соответствующих указанным в *табл. 3* большим значениям отклонения. На графиках отмечены даты начала муссонных осадков согласно отчётам

ИМД (https://metnet.imd.gov.in/docs/imdnews/ANNUAL_REPORT2016English.pdf) и описанному выше критерию, а также календарная дата, соответствующая суткам t_0 с учётом временного сдвига шаблона относительно рассматриваемого года по *табл. 3*. Если бы эта дата была выбрана в качестве начала муссонных осадков, то после совмещения данных ИВА текущего года с шаблоном эта дата совпала бы с t_0. Часто бывают ситуации, когда однозначно определить дату начала муссонных осадков не представляется возможным. Рассмотрим некоторые такие случаи.

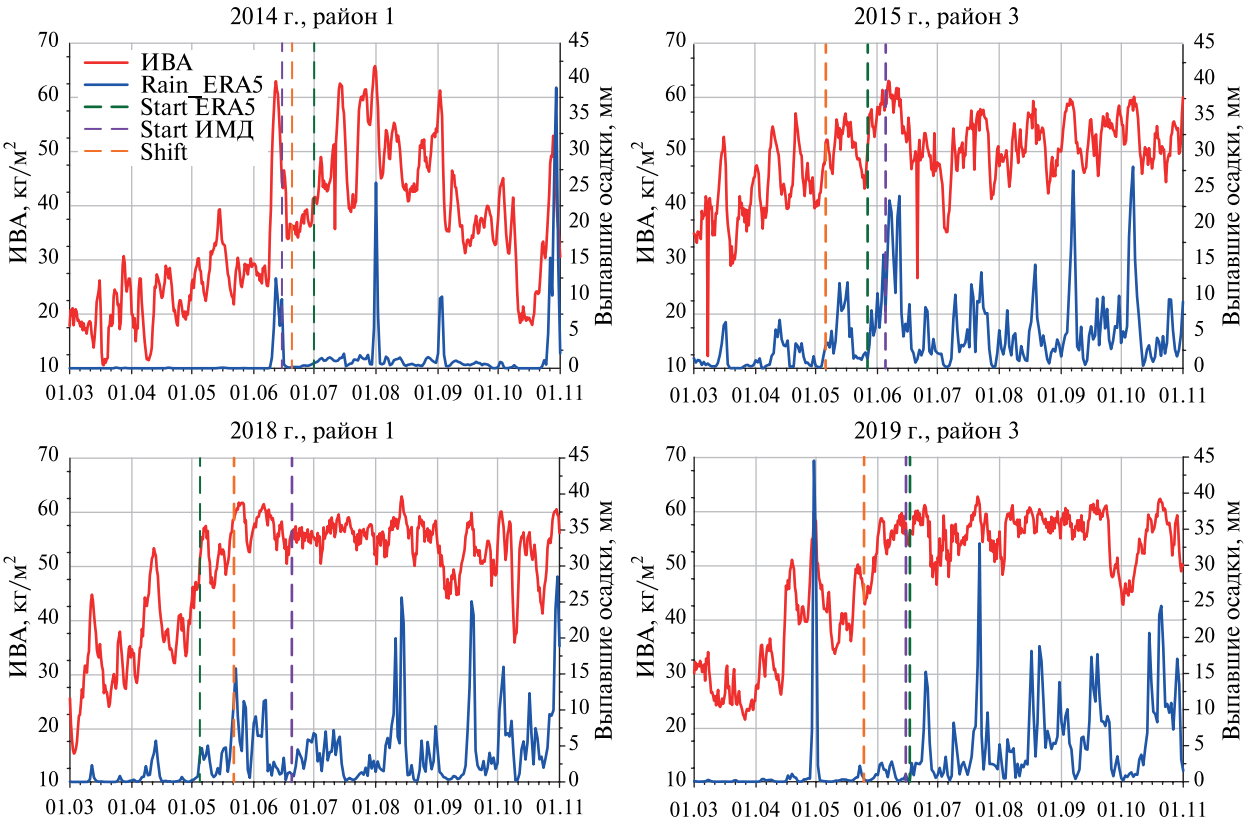


Рис. 7. Временные ряды ИВА (красная кривая) и выпавших осадков (синяя кривая) с отмеченными датами начала периода дождей по реанализу ERA5 (зелёная штриховая линия) и ИМД (сиреневая штриховая линия), а также положением даты t_0 шаблона (оранжевая штриховая линия) для района 1 за 2014 и 2018 гг. и района 3 за 2015 и 2019 гг.

Рисунок 7а демонстрирует ситуацию за 2014 г. в районе 1. Дату начала муссонных осадков по описанным выше критериям показывает зелёная штриховая линия. Дата, соответствующая суткам номер 150 на шаблоне, приходится на 20.06.2014. Она отмечена оранжевой штриховой линией и близка к дате начала муссонных осадков, определённой для района 1 по информации ИМД (фиолетовая штриховая линия). В этот день сумма выпавших осадков в районе 1 составила 1,6 мм, что ниже принятого порога 2,0 мм.

На *рис. 7б* показана ситуация за 2015 г. в районе 3, когда однозначно определить дату начала дождей довольно сложно. Первоначально была выбрана дата 27 мая (зелёная вертикальная линия) в предположении, что прошедшие ранее дожди связаны с кратковременным синоптическим явлением. Момент t_0, согласно определённому для 2015 г. сдвигу шаблона, приходится на 06.05.2015 (оранжевая штриховая линия). В эту дату сумма выпавших осадков составила 3,1 мм.

На *рис. 7в* и *г* представлены ситуации с отклонением в районе 5 за 2018 и 2019 гг. На *рис. 8* приведены алогичные ситуации в районе 6 за 2014 г., районе 9 за 2013 г. и районе 10 за 2013 и 2018 гг.

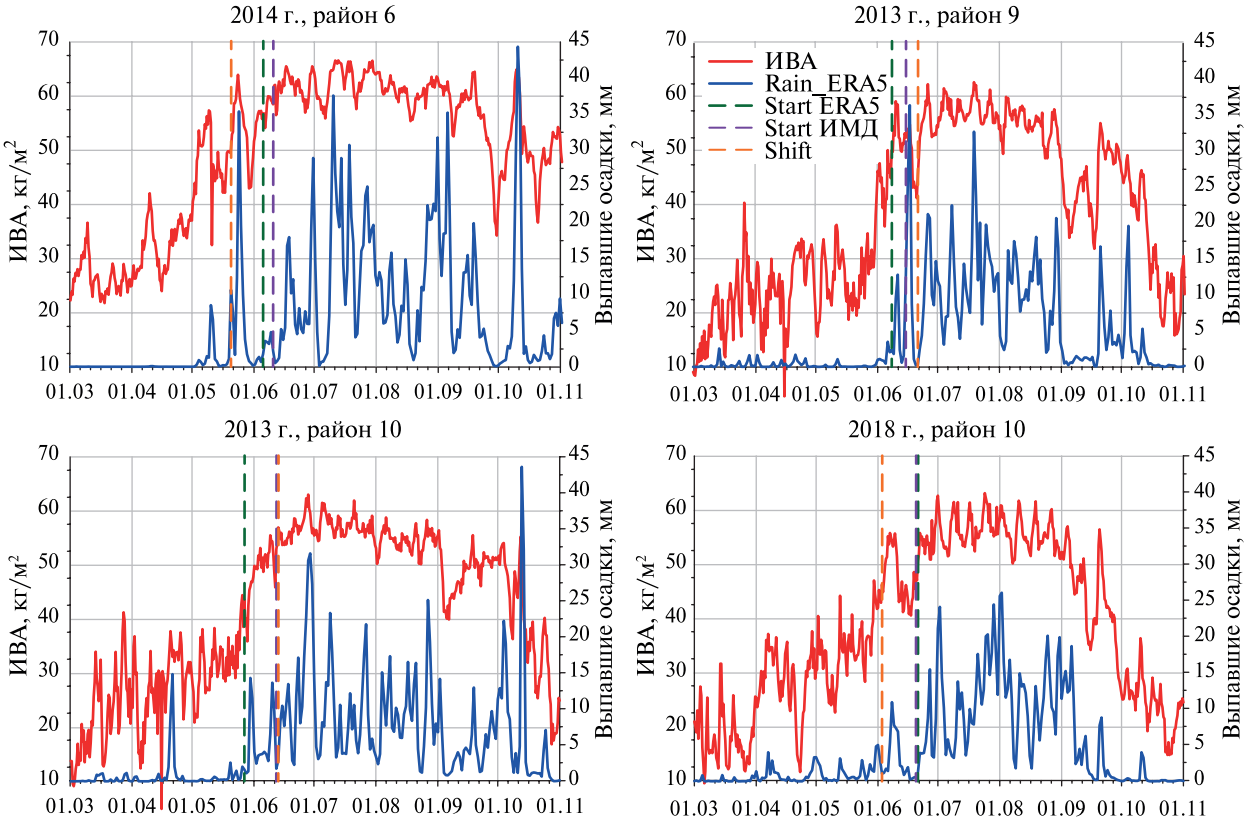


Рис. 8. Временные ряды ИВА (красная кривая) и выпавших осадков (синяя кривая) с отмеченными датами начала периода дождей по реанализу ERA5 (зелёная штриховая линия) и ИМД (сиреневая штриховая линия), а также положением даты t_0 шаблона (оранжевая штриховая линия) для района 6 за 2014 г., района 9 за 2013 г. и района 10 за 2013 и 2018 гг.

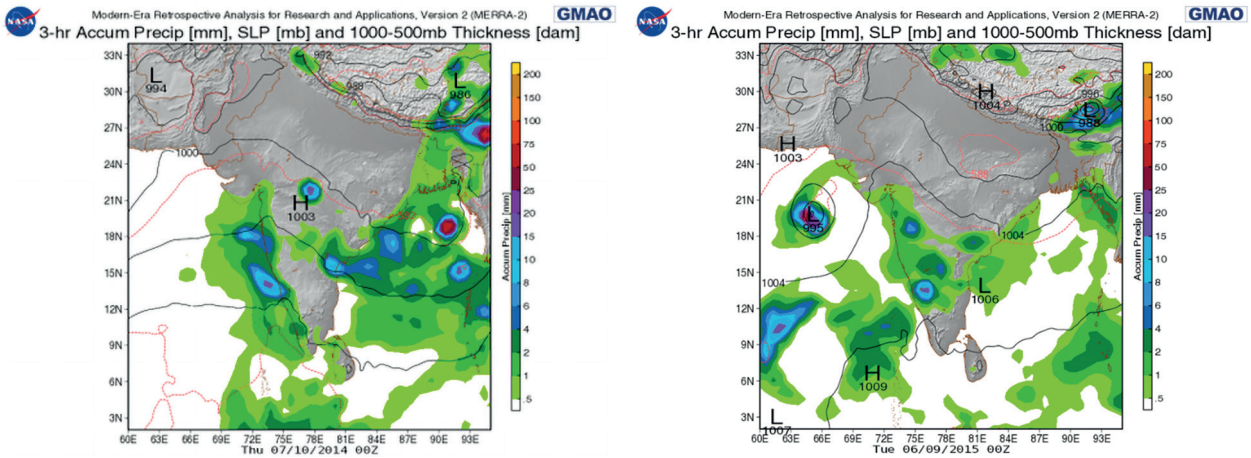
В целом анализ данных показывает, что сутки, соответствующие моменту t_0 на шаблоне, могут приходиться как на более раннюю (оранжевая штриховая линия смещается влево от зелёной), так и на более позднюю (оранжевая штриховая смещается вправо от зелёной) дату относительно исходно выбранной по указанным выше критерием. При этом примерно в половине случаев новая дата оказывается ближе к дате, полученной по информации ИМД (оранжевая штриховая ближе к сиреневой, чем к зелёной), а в другой половине случаев удаляется от неё (оранжевая штриховая линия дальше от сиреневой, чем зелёная).

Следует отметить, что и даты начала муссонных осадков в выбранных районах по информации ИМД могут характеризоваться существенными погрешностями. Как описано в первой части нашей статьи (Кузьмин и др., 2025), они были выбраны вручную в качестве примерных ориентиров посредством наложения на предоставляемые ИМД карты с изолиниями времени начала муссонных осадков на территории Индии границ выделенных нами районов, см. (Кузьмин и др., 2025, рис. 3). Существенный элемент неопределённости вносят как большие размеры районов, так и различающаяся для разных районов скорость смещения зоны муссонных осадков. Неизвестна также степень условности в детализации изолиний начала муссонных осадков, приведённых на исходных картах ИМД. Ясно только, что карты носят достаточно схематичный характер.

Более подробный анализ смещения точки t_0 для 11 районов и всех анализируемых годов выходит за рамки размеров возможной публикации. Для примера приведём сравнение по району 1. В 2014 г. наблюдалось максимальное смещение точки t_0 в данных ИВА (−11 дней), а дата начала муссонных дождей по данным ERA-5 пришлась на 01.07.2014. При анализе синоптической ситуации (карты по данным реанализа MERRA-2 (*англ.* Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2), сумма осадков за 3 ч, давление на уровне моря и толщина влагозапаса слоя 1000–500 мб) (https://fluid.nccs.nasa.gov/reanaly-

sis/classic_merra2/?motif=&stream=MERRA2&field=precip&level=0&region=india&tau=00&track=none&fcst=20140423) с 20.06 по 10.07.2014 было обнаружено, что дожди в районе 1 отмечались 09–10.07.2014 (*рис. 9а*), в то время как в остальные дни осадки не фиксировались. Для 2015 г., при нулевом смещении шаблона, дата начала муссонных осадков по данным реанализа ERA-5 была определена 06.06.2015. Анализируя синоптическую ситуацию для района 1 с 25.05 по 10.06.2015, области осадков наблюдались с 07.06 по 10.06.2015, а 09.06.2015 зафиксирован циклон (см. *рис. 9б*).

Приведённый пример на *рис. 9* показывает довольно сложную метеорологическую картину и противоречия в данных двух реанализов ERA-5 и MERRA-2. В результате для района 1 в 2015 г. при нулевом смещении точки t_0 осадки наступали на следующий день после начала периода муссонных дождей, а при смещении начальной точки на −11 дней в 2014 г. дожди начинались по данным MERRA-2 примерно на неделю (на 8 дней) позже даты начала муссона, определённой по реанализу ERA-5.



а *б*

Рис. 9. Метеорологическая обстановка в районе 1 для 10.07.2014 (*а*) и 09.06.2015 (*б*) (сумма осадков (*англ.* Accumulated precipitation, мм) за 3 ч, давление на уровне моря и толщина влагозапаса слоя на уровне 1000–500 мб) (https://fluid.nccs.nasa.gov/reanalysis/classic_merra2/?motif=&stream=MERRA2&field=precip&level=0&region=india&tau=00&track=none&fcst=20140423)

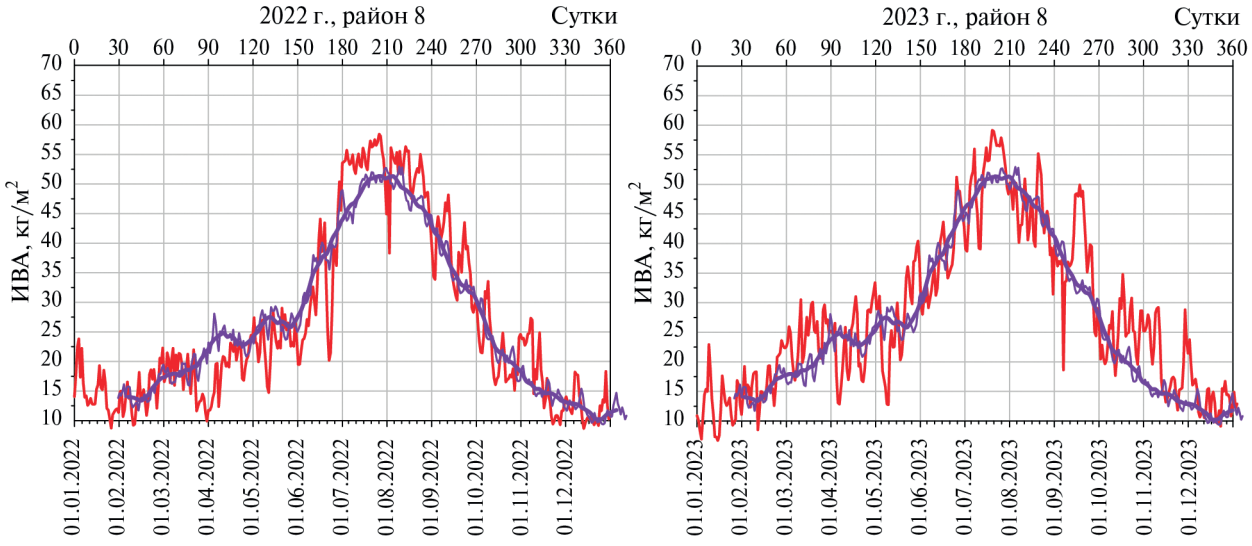


Рис. 10. Временной ряд ИВА (красная линия) для района 8 за 2022 и 2023 гг. с наложенным шаблоном по данным 2013–2020 гг., тонкая сиреневая линия показывает шаблон, толстая — результат его сглаживания в окне 13 сут

Сравнение шаблона с данными ИВА за 2022 и 2023 гг.

В качестве завершающего элемента анализа в работе в методических целях выполнено совмещение полученных шаблонов с данными за 2022 и 2023 гг., которые не были использованы при построении шаблонов. Для примера на *рис. 10* приведены графики ИВА для района 8 за 2022 и 2023 гг., оптимально совмещённые с шаблоном, полученным по данным 2013–2020 гг. Эти графики показывают хорошее соответствие шаблона, определённого за 2013–2020 гг., данным ИВА за 2022 и 2023 гг.

В приведённых примерах коэффициент корреляции между годовым рядом ИВА и шаблоном составил 0,91 для 2022 г. и 0,90 для 2023 г. Начало периода дождей приходится на сутки $t_0 = 150 \pm 2$ шаблона с учётом полученного оптимального сдвига (26.06.2022 и 21.06.2023). Аналогичные результаты получены для всех районов, за исключением районов 1, 2, 4, находящихся на море, и района 11 на суше. Для этих районов отклонение начала периода дождей от точки t_0 шаблона вдвое больше (около 4 сут).

Выводы

Во второй части работы построены и проанализированы средние годичные временные зависимости влагосодержания атмосферы (шаблоны) для каждого из 11 выделенных районов вблизи полуострова Индостан. Для анализа всей совокупности данных ИВА использована итерационная схема усреднения временных последовательностей ИВА каждого района с выравниванием по времени даты начала периода дождей в качестве первого приближения, которое было выбрано по данным выпавших осадков ERA5. Критерием остановки итерационной схемы было достижение максимальной корреляции между шаблоном и соответствующими временными рядами ИВА за все годы. Полученные шаблоны ИВА действительно имеют высокую корреляцию с данными ИВА по каждому году (в основном более 0,85).

Полученные шаблоны ИВА подтверждают первоначально выдвинутую гипотезу, что поведение ИВА практически полностью определяется внутригодовой миграцией внутритропической зоны конвергенции. Такое закономерное изменение значений ИВА позволяет предложить использование многолетнего среднего временного хода ИВА (шаблона) для исследования принципиальной возможности разработки конкретных подходов к прогнозированию даты начала муссона. Следует отметить, что такой подход в перспективе можно будет применить к любым крупным районам в пределах полуострова Индостан.

Основное направление нашей дальнейшей деятельности будет связано с разработкой методики наложения шаблона ИВА на (неполный) временной ряд ИВА текущего года для предсказания даты начала периода дождей. Другое направление — создание шаблонов ИВА для районов суши на территории центрального и южного Индостана.

Ещё один важный круг вопросов связан со стабильностью связи начала муссонных осадков с выделенной точкой на шаблоне района, соответствующей, согласно нашей рабочей гипотезе, подготовленному состоянию атмосферы, которое определяется не только достижением определённой влажности воздуха, но и возможностью прихода новых насыщенных влагой воздушных масс с юга в процессе выпадения осадков. Необходимо исследовать причины отдельных выбросов предполагаемых дат начала муссонных осадков (особая синоптическая обстановка, артефакты интерпретации данных) и провести их полномасштабное сопоставление с достоверной и по возможности более детализированной информацией из независимого источника (приоритетно — Индийского метеорологического департамента). Тем не менее уже сейчас представляется довольно перспективным предлагаемый подход к прогнозу начала муссонных осадков, по крайней мере, над некоторыми регионами суши, в частности над районами 7 и 8 из исследованных нами.

Работа выполнена в рамках государственных заданий Института космических исследований РАН (тема «Мониторинг», госрегистрация № 126031818938-6), в части темати-

ческой обработки и анализа данных, и Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН № 075-00395-25-00, в части применения алгоритмов интерполяционного устранения пропусков данных (спутниковое радиотепловидение).

Литература

1. *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.
2. *Кузьмин А. В.*, *Ермаков Д. М.*, *Головко А. Г.* Исследование летнего муссона близ полуострова Индостан в поле интегрального влагосодержания атмосферы по данным спутниковых микроволновых радиометров. Часть 1 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 6. С. 365–379. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-365-379.
3. *Hersbach H.*, *Bell B.*, *Berrisford P. et al.* ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), 2025. DOI: 10.24381/cds.adbb2d47.
4. *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.
5. *Ludescher J.*, *Martin M.*, *Boers N. et al.* Network-based forecasting of climate phenomena // PNAS. 2021. V. 118. No. 47. Article e1922872118. https://doi.org/10.1073/pnas.1922872118.
6. *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.

A study of the summer monsoon near the Hindustan Peninsula in the atmospheric precipitable water vapor field based on satellite microwave radiometer data: Part 2

A. V. Kuzmin [1], D. M. Ermakov [1,2], A. G. Golovko [1], R. D. Koniashov [1]

[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, Moscow Region 141190, Russia
E-mail: d.m.ermakov@cosmos.ru

In the first part of our article, published in 2025, it was shown that the field of precipitable water vapor (PWV), derived from of F16–F18 SSMIS (Special Sensor Microwave Imager/Sounder) microwave radiometric satellite data, exhibits similar seasonal variations across all studied regions over Hindustan and surrounding waters of the Indian Ocean: the phase of lowest winter values is followed by an increase at an approximately constant rate, which varies only slightly among regions, and then by a plateau of maximum values, coinciding approximately with the onset of monsoon precipitation in the region. In the present study, mean PWV temporal dependences (templates) were constructed for each of the 11 designated areas near the Hindustan Peninsula. For this purpose, an iterative averaging scheme was employed, applied to the annual time series of PWV for each region, with a time shift (alignment). The stopping criterion for the iterative scheme was achieving maximum correlation between the template and the corresponding PWV time series across all years. The application of this approach pursued a dual objective. First, to confirm that the large-scale features of the PWV temporal evolution in each region are reproduced year after year with a high degree of similarity, and that interannual variability manifests primarily in the relative shift of the calendar dates marking the onset of PWV increase in each region. Second, to obtain the template itself for each region, i.e., the averaged PWV temporal pattern that exhibits maximum correlation with the data for each year under consideration. The resulting PWV templates indeed showed high correlation with the PWV data for each year (mostly exceeding 0.85). This confirms the initial hypothesis that the temporal evolution of PWV

in the studied regions is almost entirely determined by the intra-annual migration of the Intertropical Convergence Zone. Such systematic variation in PWV values enables the use of the constructed templates to investigate the feasibility and to develop specific approaches for predicting the onset date of the monsoon. Extending this approach to the entire Hindustan Peninsula by subdividing it into equally-sized regions appears promising.

The work was carried out within the framework of the state assignments of IKI RAS (Monitoring, registration No. 126031818938-6), in part of thematic processing and analysis of data, and IRE RAS (state registration No. 075-00395-25-00), in part of application to processing of interpolation algorithms for eliminating data gaps.

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

Accepted: 06.07.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-4-417-431

References

1. Kuzmin A. V., Ermakov D. M., Surovyatkina E. D. et al., Study of 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.
2. Kuzmin A. V., Ermakov D. M., Golovko A. G., A study of the summer monsoon near the Hindustan Peninsula in the atmospheric precipitable water vapor field based on satellite microwave radiometers data: Part 1. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2025, V. 22, No. 6, pp. 365–379 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-365-379.
3. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al., *ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present*, Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), 2025, DOI: 10.24381/cds.adbb2d47.
4. 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, https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0063.1.
5. Ludescher J., Martin M., Boers N. et al., Network-based forecasting of climate phenomena, *PNAS*, 2021, V. 118, No. 47, Article e1922872118, https://doi.org/10.1073/pnas.1922872118.
6. 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, https://doi.org/10.1002/2016GL068392.