

«Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»  
ИКИ РАН

# Использование спутниковых данных микроволнового зондирования для определения начала южноазиатского муссона для Индийского субконтинента

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

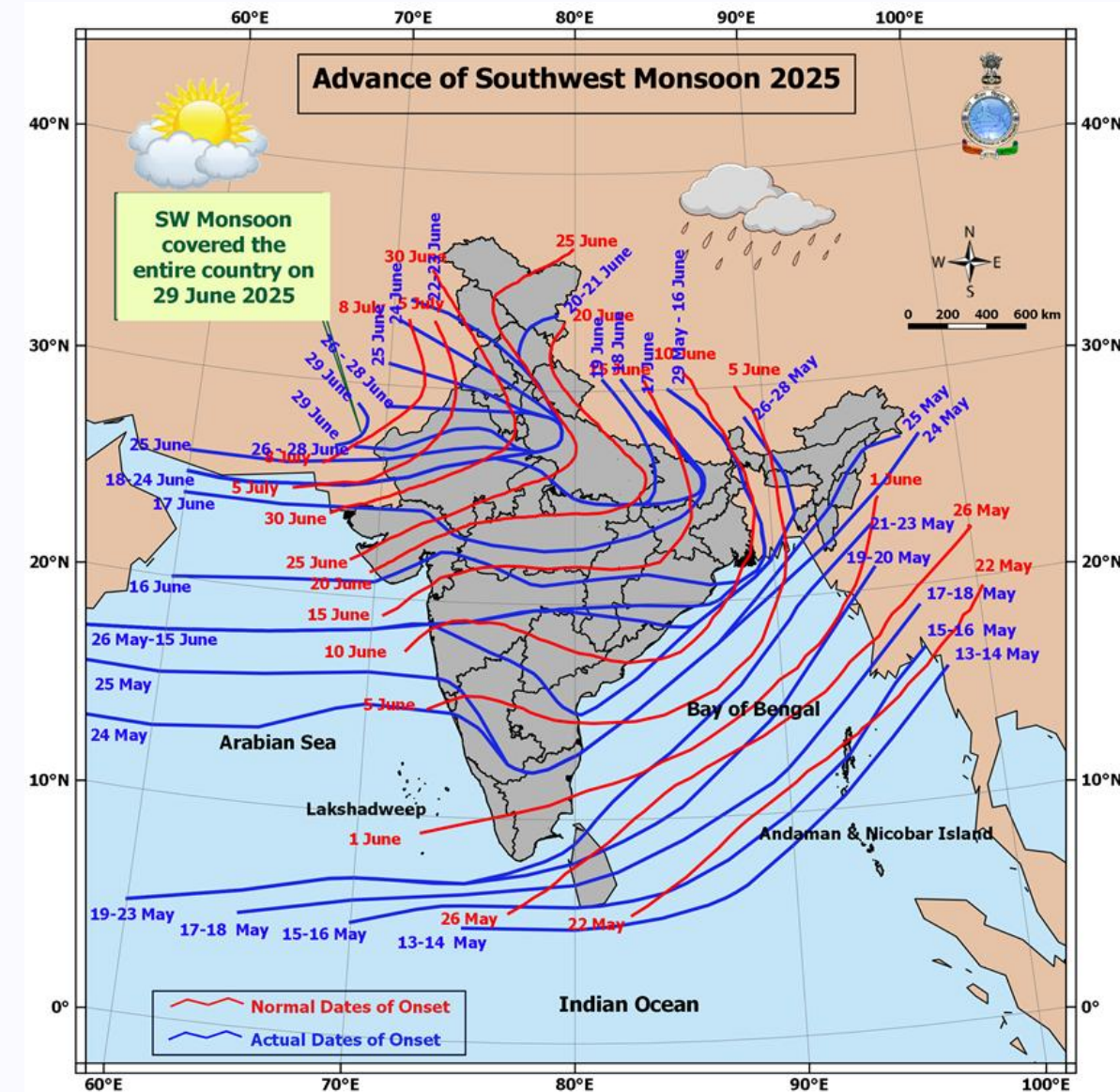
<sup>1</sup> Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал (ФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН), Фрязино, Московская область, Россия

Москва  
2025

# Актуальность

- Южноазиатский летний муссон является критически важным климатическим явлением для Индийского субконтинента, где проживает почти 1,5 миллиарда человек.
- Сезон муссонов, длящийся четыре месяца, приносит до 80% годовой нормы осадков, что делает заблаговременное и точное прогнозирование дат его начала и окончания жизненно важной задачей. Неверно спрогнозированное наступление муссона приводит к значительным экономическим потерям и угрожает продовольственной стабильности.
- Принципиальную роль играет пространственно-временное распределение водяного пара в атмосфере Земли.
- В проведённом исследовании предложен новый подход к прогнозированию начала и развития южноазиатского летнего муссона на основе анализа пространственно-временных вариаций интегрального влагосодержания атмосферы (ИВА) по данным спутникового микроволнового радиометрического зондирования.



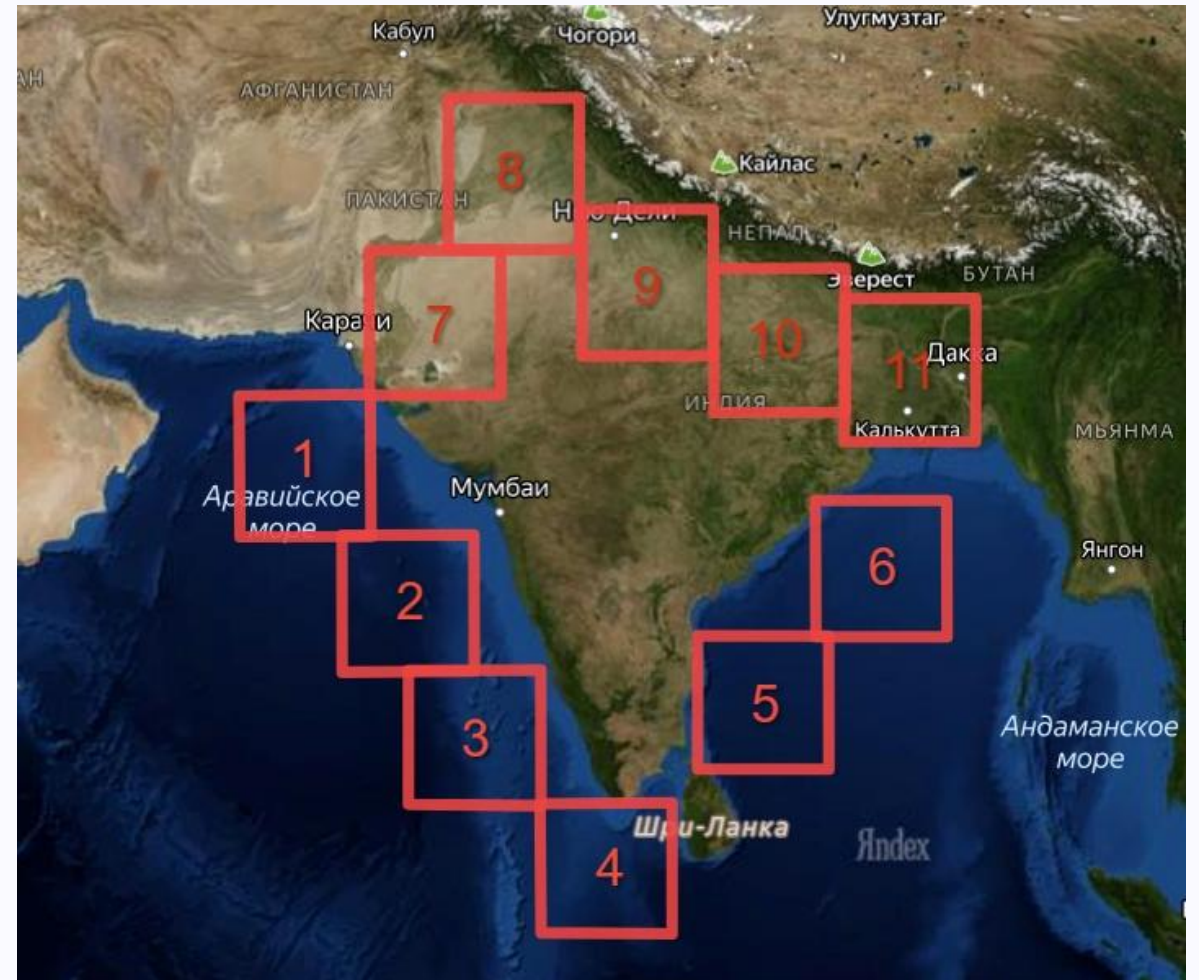
<https://mausam.imd.gov.in/>

# Область исследования

Данные ИВА получены по микроволновым радиометрическим данным спутников SSMIS F16-F18.

В восстановлении ИВА из данных SSMIS использовалась технология искусственных нейронных сетей и методика подхода спутникового радиотепловидения.

В результате получены ежесуточные поля ИВА за 2012–2021 гг. с интервалом 3 ч на координатной сетке  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$



Районы исследования



# Радиометрические данные

- Для восстановления **PWV** (precipitable water vapor) использовались данные спутников SSMIS за 2012-2023 гг.
- Была использована ИНС. Для восстановления PWV использовалась технология искусственных нейронных сетей (ИНС) прямого распространения с 10 нейронами в скрытом слое с передаточной функцией tanh.
- В качестве входов ИНС использовались радиометрические данные TDR Base (L1A) SSMIS F16-F18 каналов 1-18 и высота рельефа с флагом типа поверхности. Всего — 20 входов. Выход — значение PWV.
- Для обучения ИНС использовались данные **реанализа ECMWF Era 5 за 2020 год**, совмещённые со спутниковыми данными по времени в пределах  $\pm 15$  мин. Размер обучающей выборки составил 5 млн точек.
- Для тестирования сети использовались 3 млн точек измерений SSMIS, совмещённых с данными ECMWF Era 5. По результатам тестирования точность восстановления PWV предложенным нейросетевым алгоритмом над всеми типами поверхности составила **2,4 мм**, а над сушей — **около 3 мм**. По данным TDR Base (L1A) SSMIS F16-F18 были получены ежедневные поля водяного пара за период с 2012 по 2021 гг.

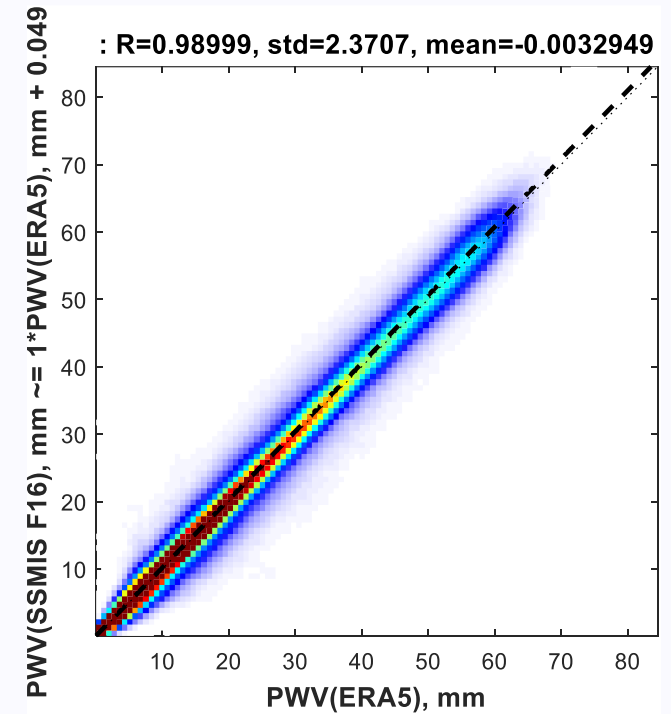
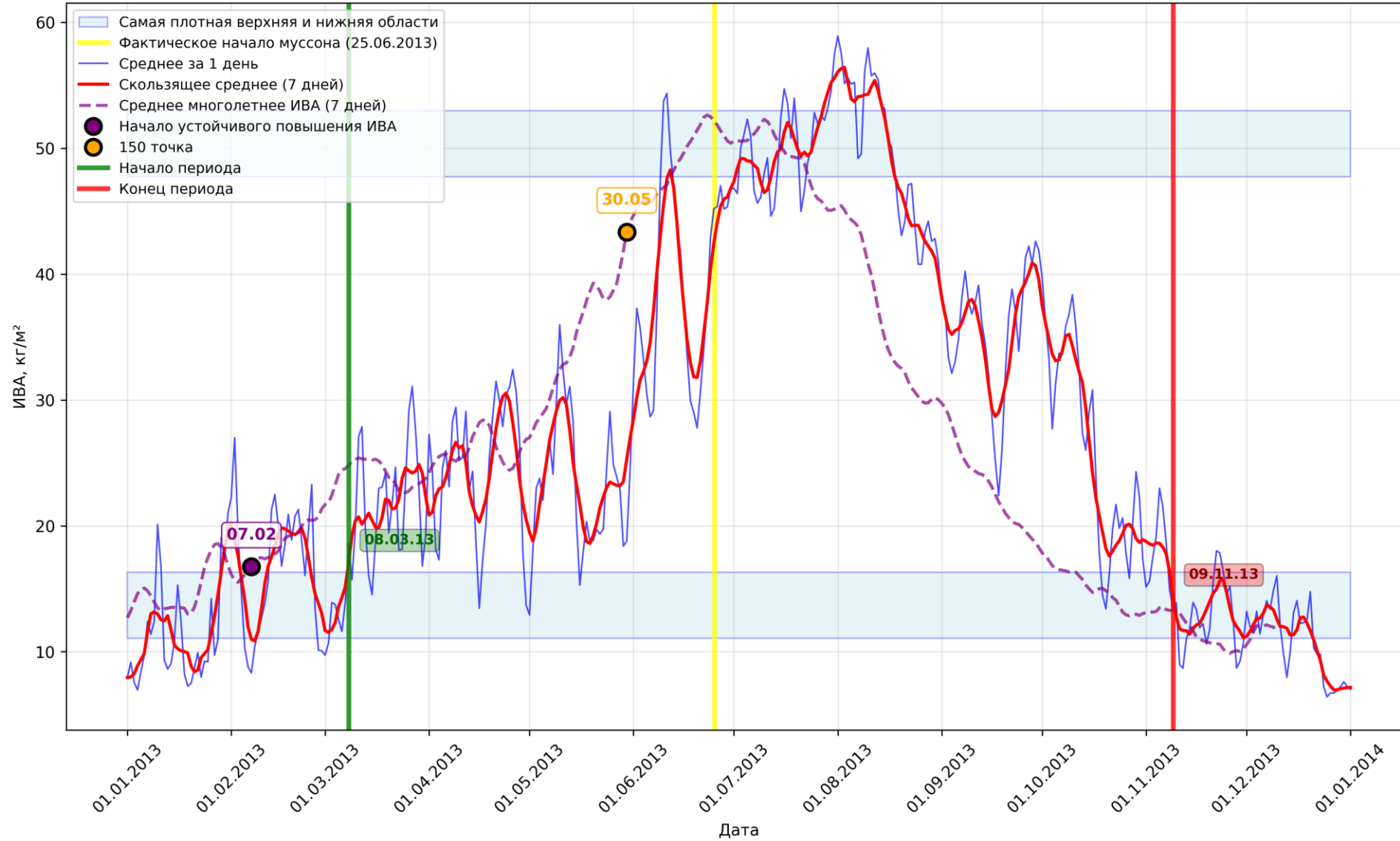


Диаграмма рассеяния PWV, восстановленного по данным SSMIS F16, и PWV по данным реанализа ECMWF Era 5 за 2020 год над всем Земным шаром

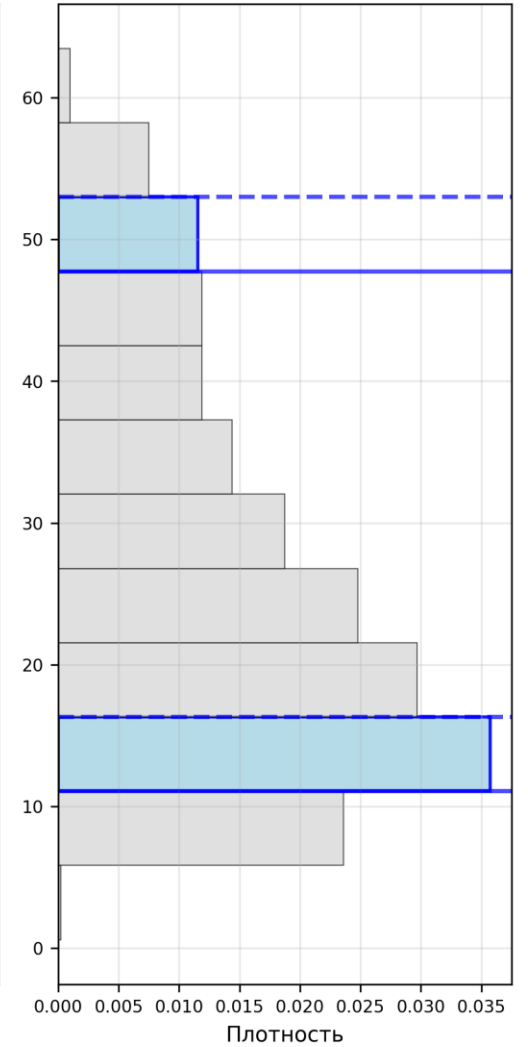


# Анализ ИВА для 8 региона, 2013 г.

Регион 8, 2013 год, граница Пакистана с Индией

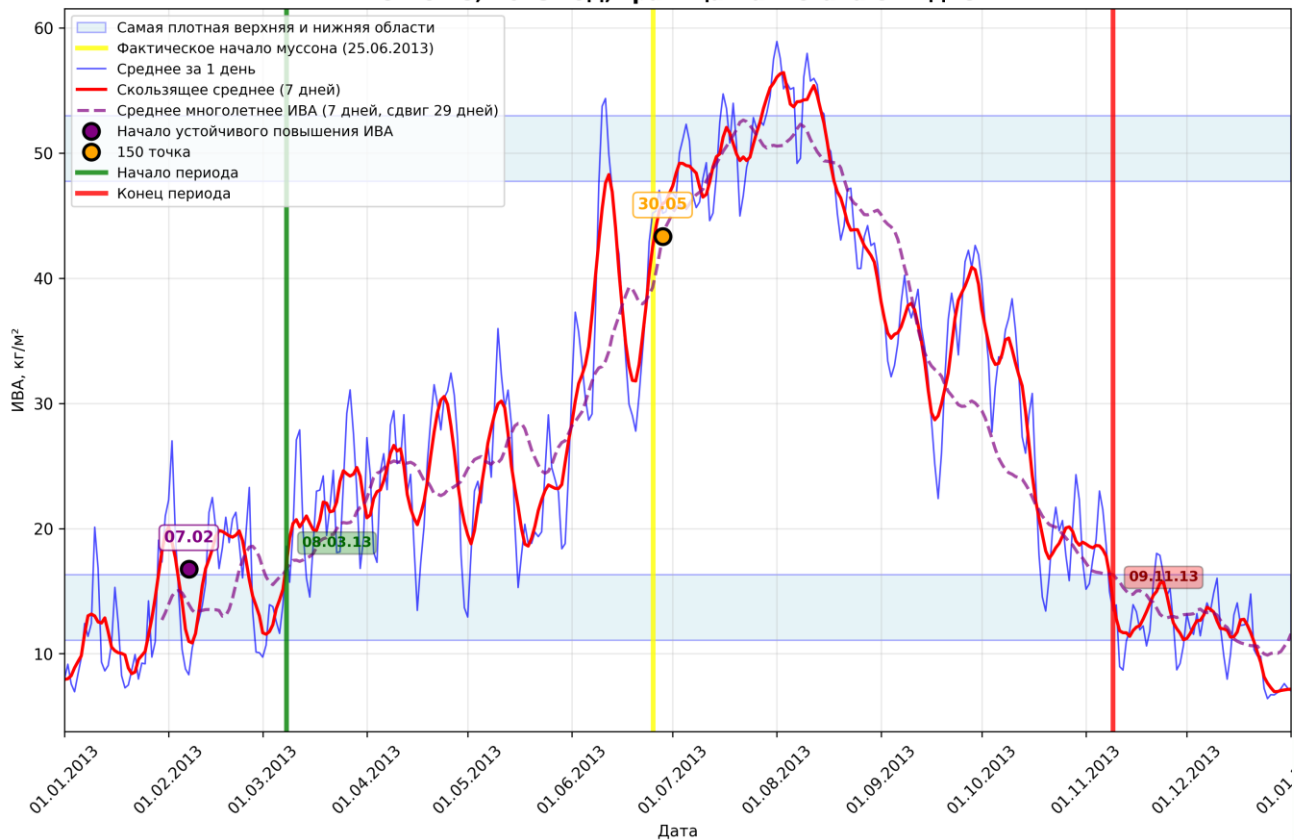


Общая гистограмма (все годы)



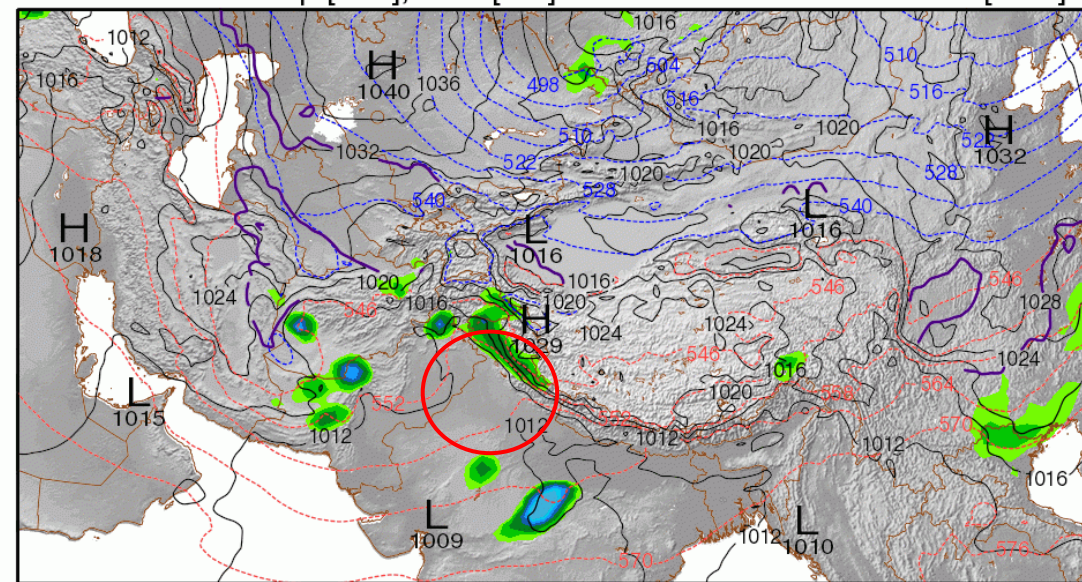
# Анализ ИВА для 8 региона, 2013 г.

Регион 8, 2013 год, граница Пакистана с Индией



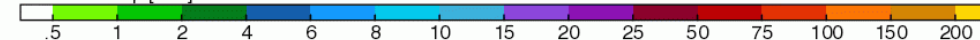
Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2)

3-hr Accum Precip [mm], SLP [mb] and 1000-500mb Thickness [dam]



Fri 02/15/2013 00Z

Accum Precip [mm]



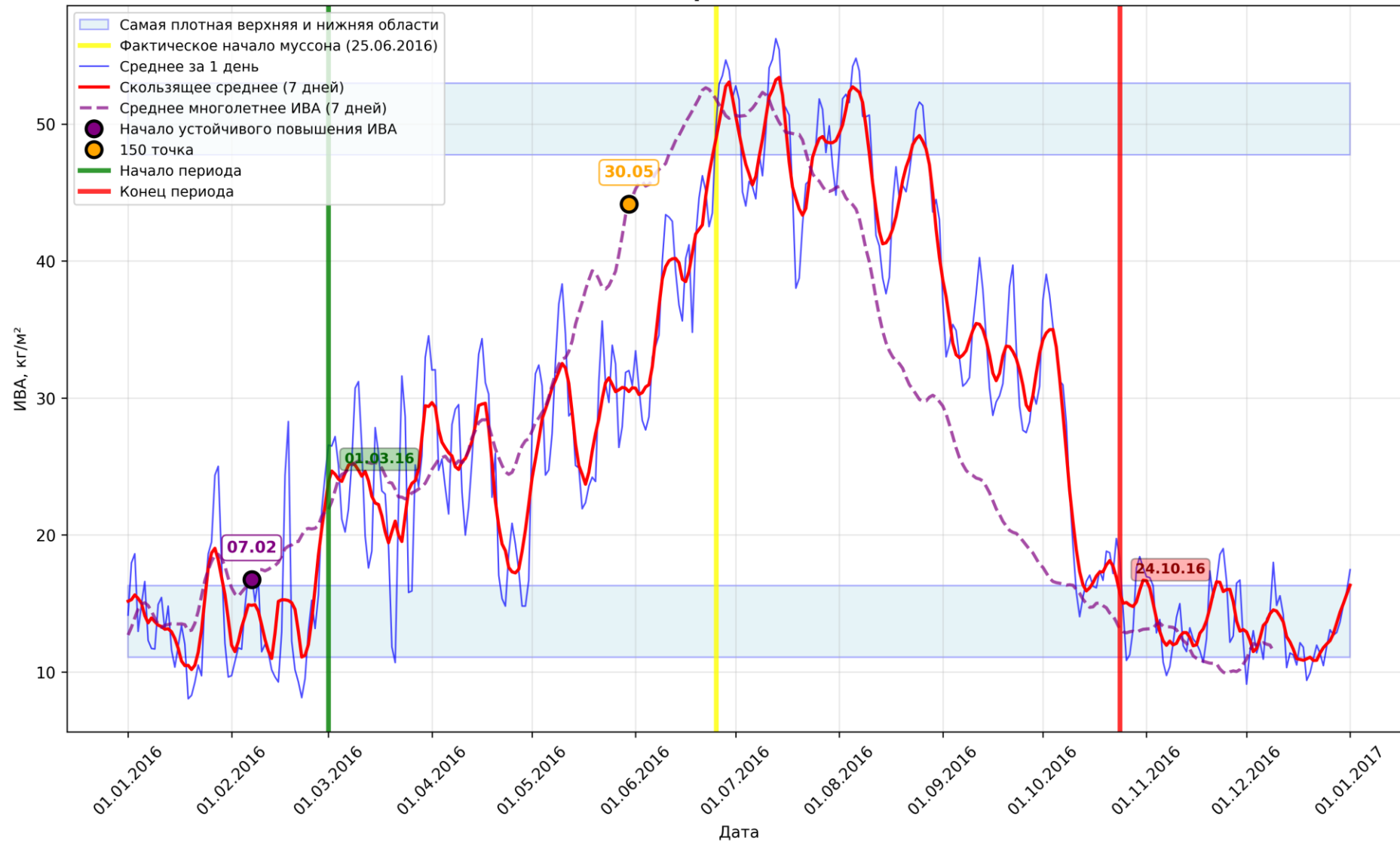
Количество осадков за 3 часа (мм), давление на уровне моря (мб) и давление в слое 1000-500 мб (декаметры) над Индией

15.02.2013-15.03.2013

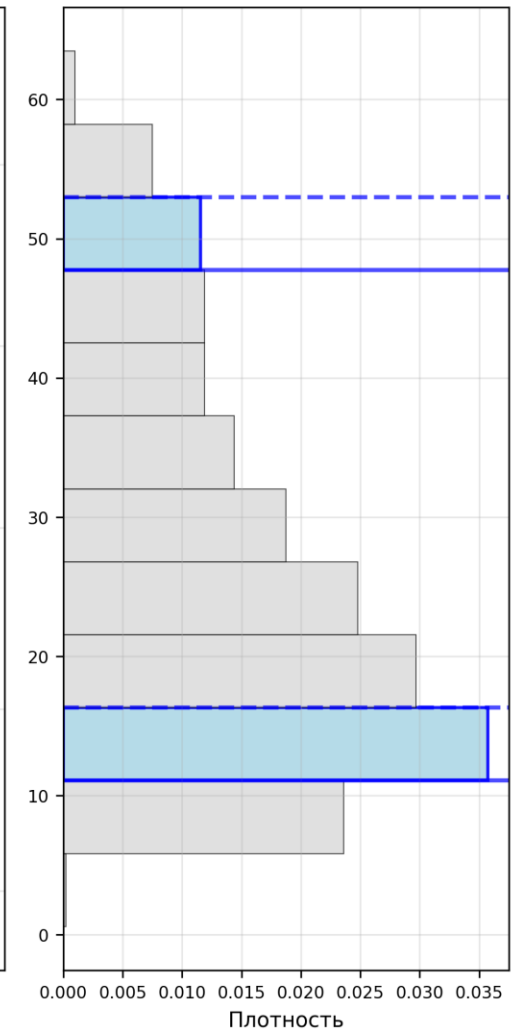
[https://fluid.nccs.nasa.gov/reanalysis/classic\\_merra2/?stream=MERRA2&field=precip&level=0&region=nasia&tau=00&track=none&fcst=20180430](https://fluid.nccs.nasa.gov/reanalysis/classic_merra2/?stream=MERRA2&field=precip&level=0&region=nasia&tau=00&track=none&fcst=20180430)

# Анализ ИВА для 8 региона, 2016 г.

Регион 8, 2016 год, граница Пакистана с Индией



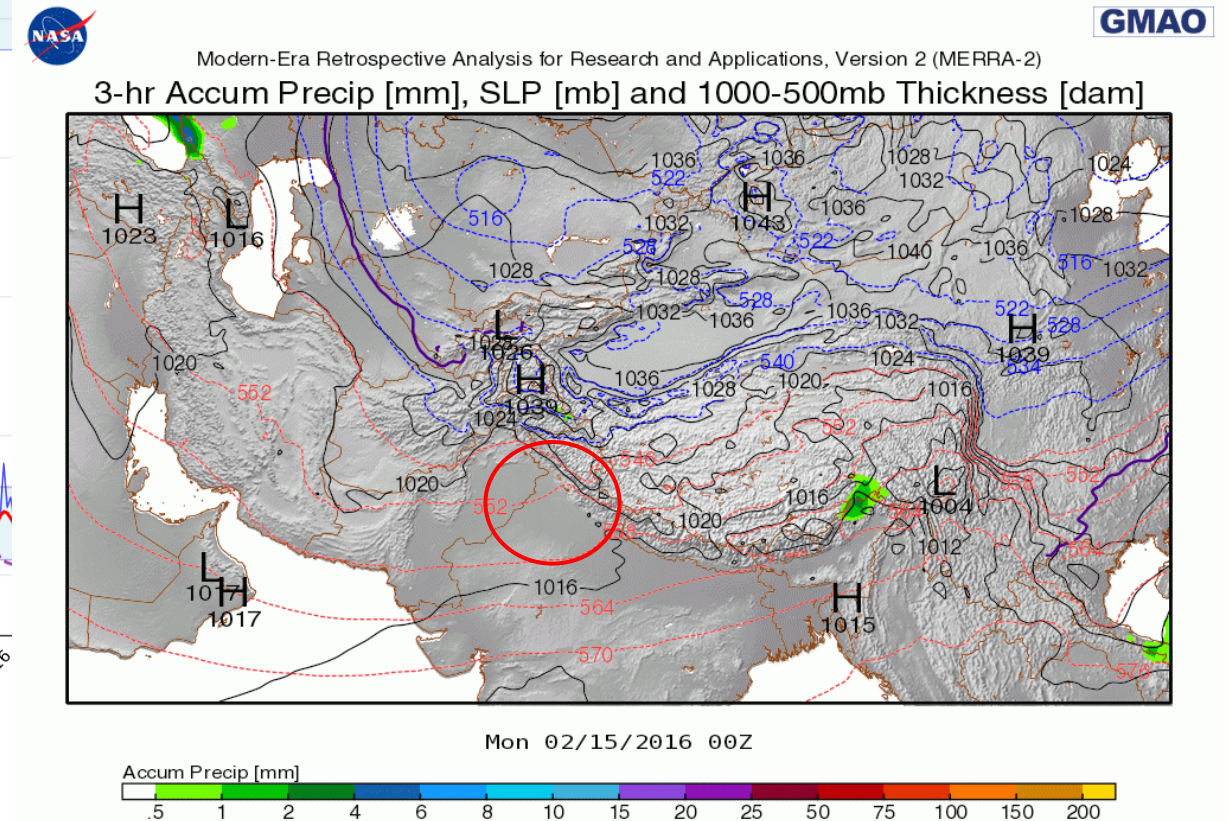
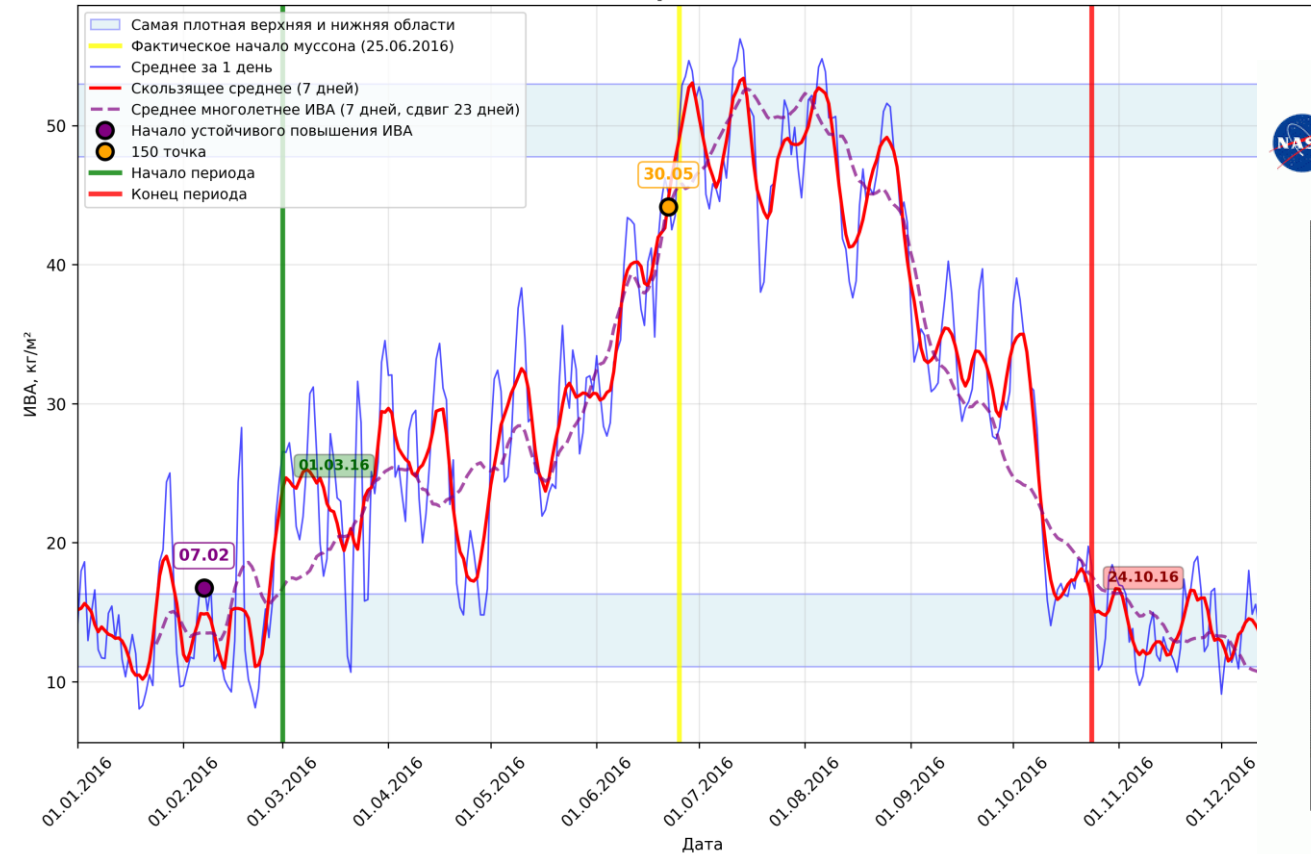
Общая гистограмма  
(все годы)





# Анализ ИВА для 8 региона, 2016 г.

Регион 8, 2016 год, граница Пакистана с Индией

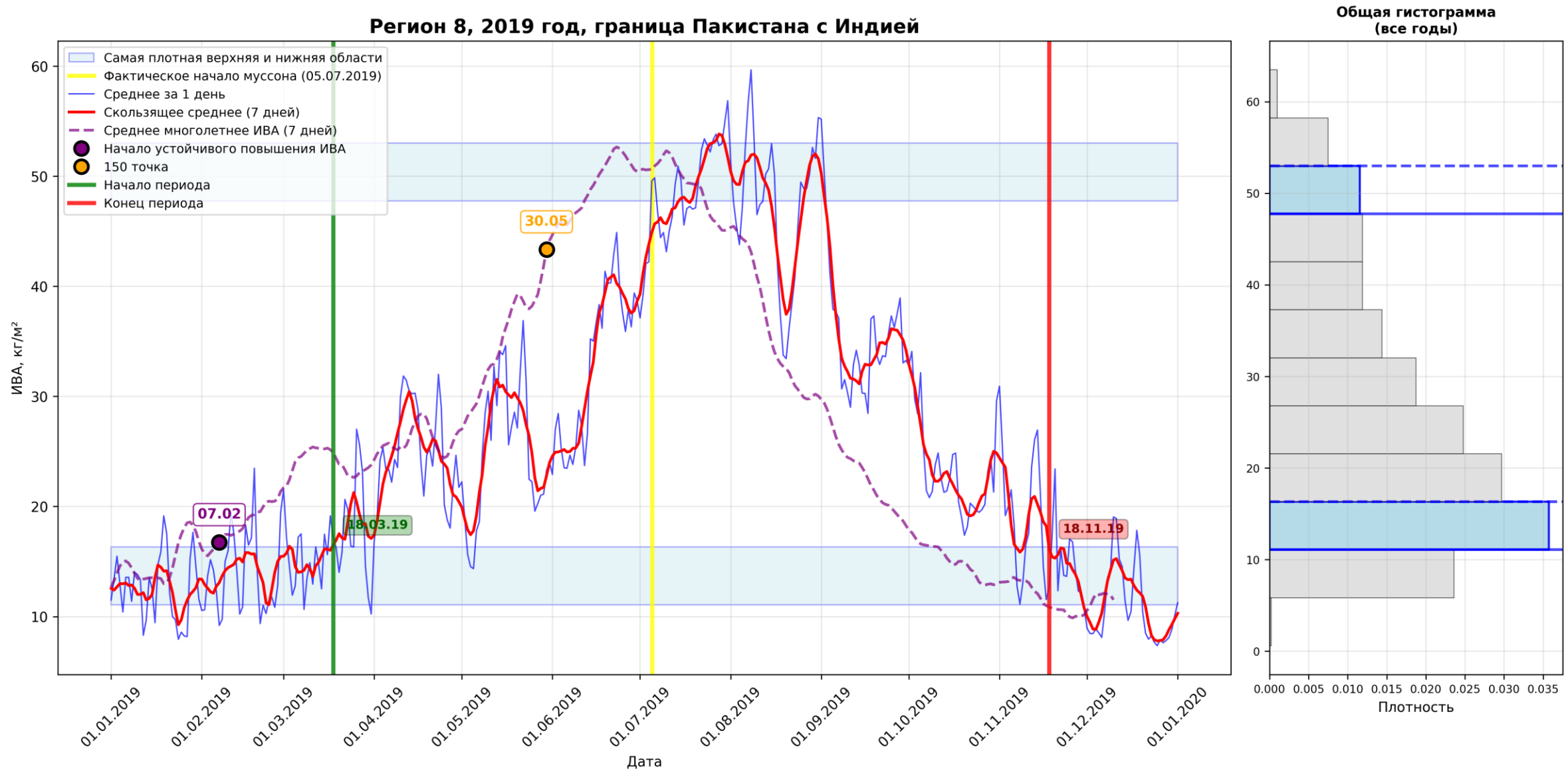


Количество осадков за 3 часа (мм), давление на уровне моря (мб) и давление в слое 1000-500 мб (декаметры) над Индией

15.02.2013-15.03.2016

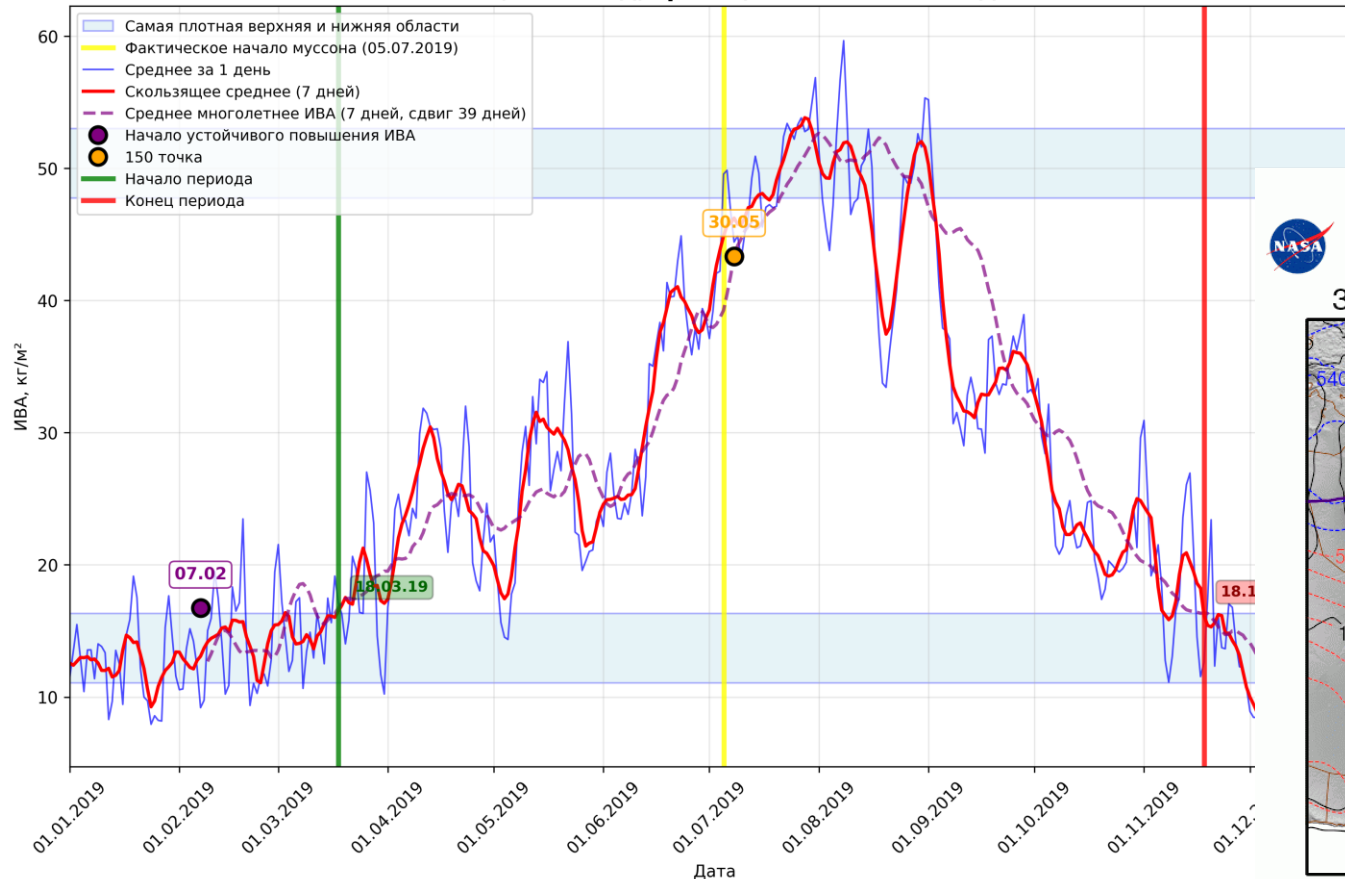
[https://fluid.nccs.nasa.gov/reanalysis/classic\\_merra2/?stream=MERRA2&field=precip&level=0&region=nasia&tau=00&track=none&fcst=20180430](https://fluid.nccs.nasa.gov/reanalysis/classic_merra2/?stream=MERRA2&field=precip&level=0&region=nasia&tau=00&track=none&fcst=20180430)

# Анализ ИВА для 8 региона, 2019 г.



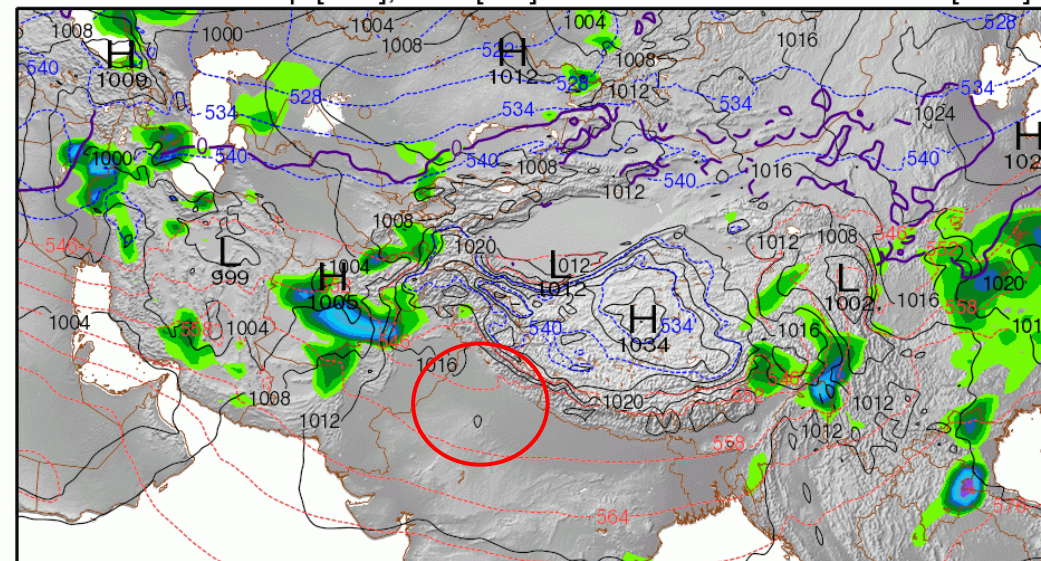
# Анализ ИВА для 8 региона, 2019 г.

Регион 8, 2019 год, граница Пакистана с Индией



Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2)

3-hr Accum Precip [mm], SLP [mb] and 1000-500mb Thickness [dam]



Fri 03/01/2019 00Z

Accum Precip [mm]



Количество осадков за 3 часа (мм), давление на уровне моря (мб) и давление в слое 1000-500 мб (декаметры) над Индией

01.03.2019-31.03.2019

[https://fluid.nccs.nasa.gov/reanalysis/classic\\_merra2/?stream=MERRA2&field=precip&level=0&region=nasia&tau=00&track=none&fcst=20180430](https://fluid.nccs.nasa.gov/reanalysis/classic_merra2/?stream=MERRA2&field=precip&level=0&region=nasia&tau=00&track=none&fcst=20180430)

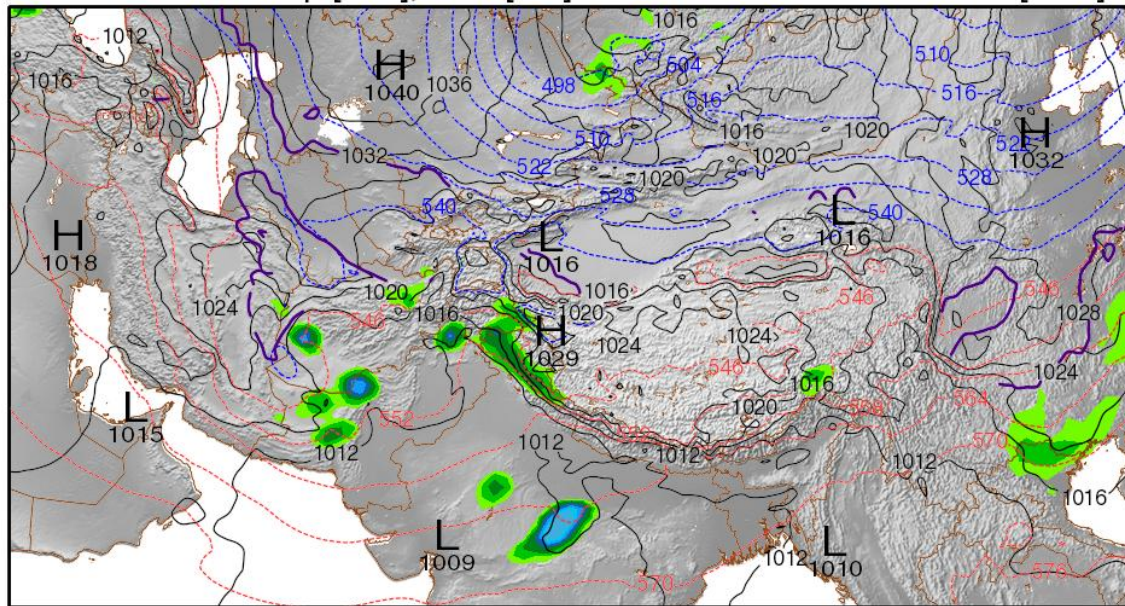


# Анализ синоптических процессов для 8 региона, 2013 г.



Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2)

3-hr Accum Precip [mm], SLP [mb] and 1000-500mb Thickness [dam]



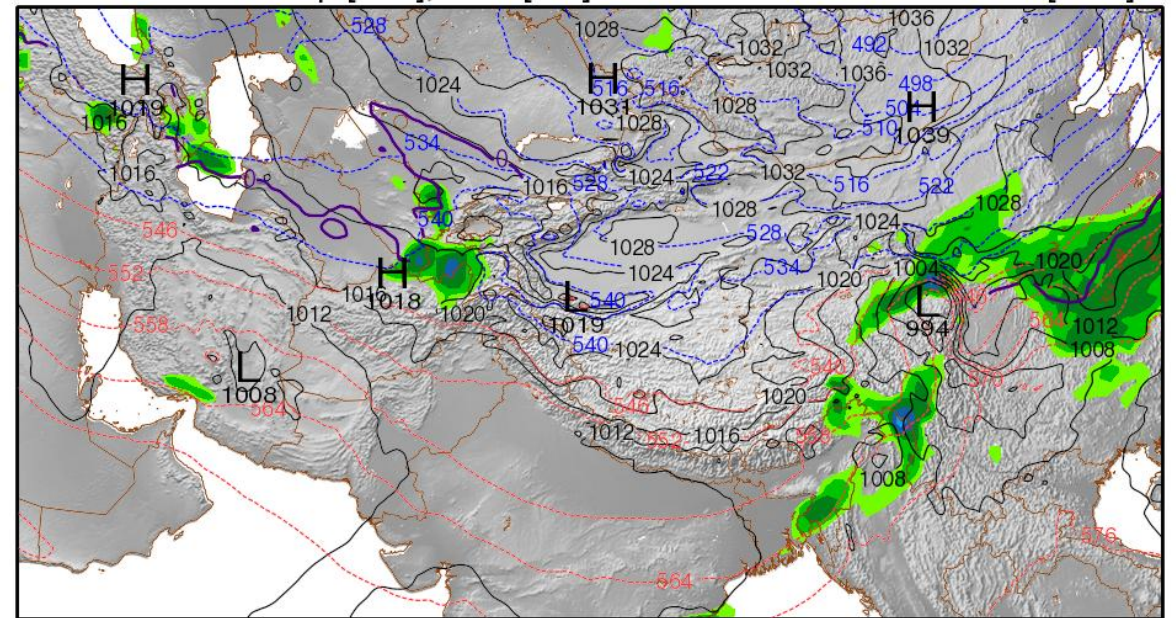
Fri 02/15/2013 00Z

Accum Precip [mm]



Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2)

3-hr Accum Precip [mm], SLP [mb] and 1000-500mb Thickness [dam]



Mon 02/18/2013 00Z

Accum Precip [mm]



Количество осадков за 3 часа (мм), давление на уровне моря (мб) и давление в слое 1000-500 мб (декаметры) над Индией для **15.02.2013 (слева)** и **18.02.2013 (справа)**

[https://fluid.nccs.nasa.gov/reanalysis/classic\\_merra2/?stream=MERRA2&field=precip&level=0&region=nasia&tau=00&track=none&fcst=20180430](https://fluid.nccs.nasa.gov/reanalysis/classic_merra2/?stream=MERRA2&field=precip&level=0&region=nasia&tau=00&track=none&fcst=20180430)



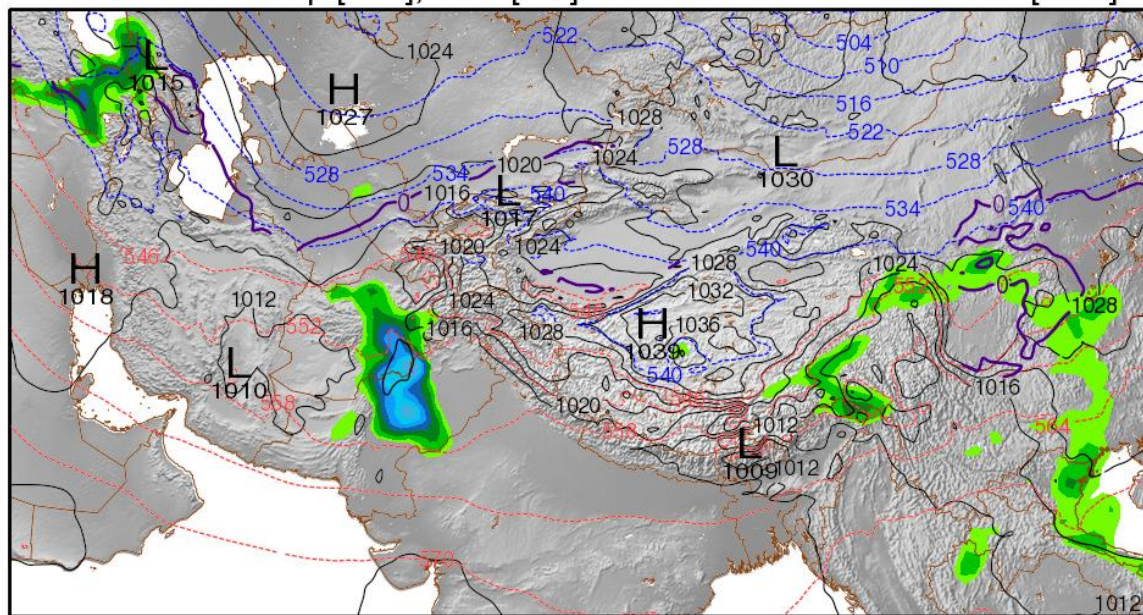
# Анализ синоптических процессов для 8 региона, 2013 г.



Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2)

GMAO

3-hr Accum Precip [mm], SLP [mb] and 1000-500mb Thickness [dam]



Thu 02/21/2013 00Z

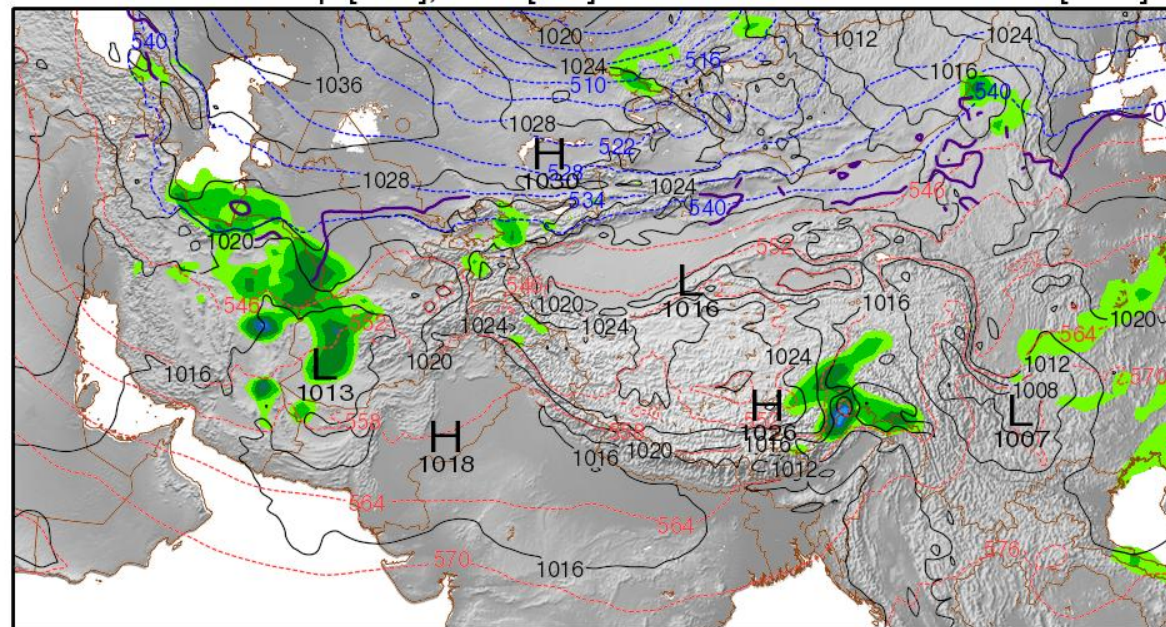
Accum Precip [mm]



Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2)

GMAO

3-hr Accum Precip [mm], SLP [mb] and 1000-500mb Thickness [dam]



Mon 02/25/2013 00Z

Accum Precip [mm]



Количество осадков за 3 часа (мм), давление на уровне моря (мб) и давление в слое 1000-500 мб (декаметры) над Индией для **21.02.2013 (слева)** и **25.02.2013 (справа)**

[https://fluid.nccs.nasa.gov/reanalysis/classic\\_merra2/?stream=MERRA2&field=precip&level=0&region=nasia&tau=00&track=none&fcst=20180430](https://fluid.nccs.nasa.gov/reanalysis/classic_merra2/?stream=MERRA2&field=precip&level=0&region=nasia&tau=00&track=none&fcst=20180430)

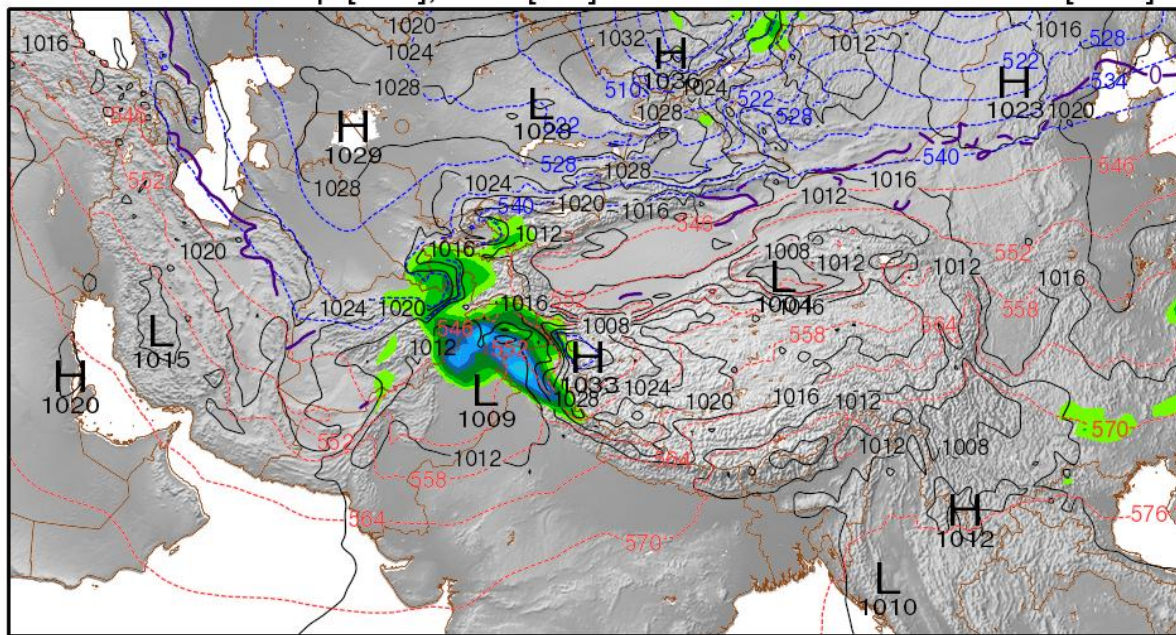


# Анализ синоптических процессов для 8 региона, 2013 г.



Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2)

3-hr Accum Precip [mm], SLP [mb] and 1000-500mb Thickness [dam]



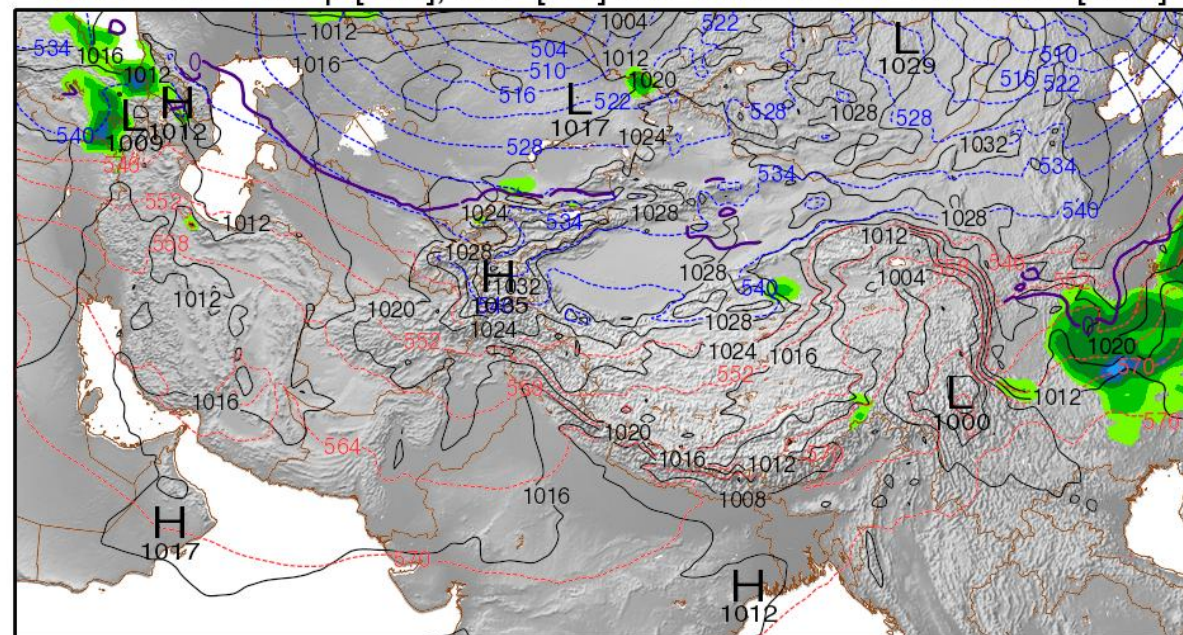
Wed 02/27/2013 00Z

Accum Precip [mm]



Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2)

3-hr Accum Precip [mm], SLP [mb] and 1000-500mb Thickness [dam]



Fri 03/01/2013 00Z

Accum Precip [mm]



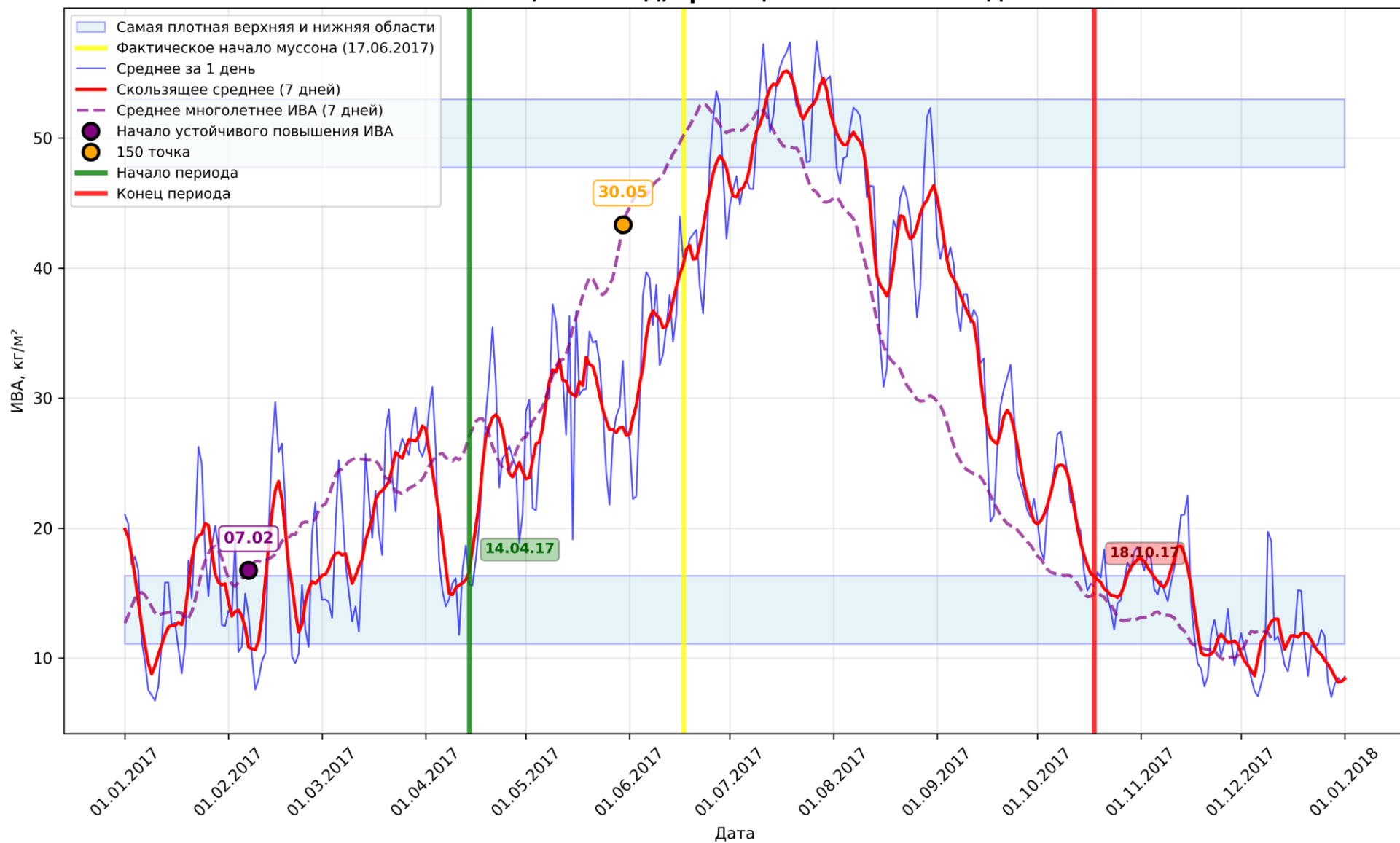
Количество осадков за 3 часа (мм), давление на уровне моря (мб) и давление в слое 1000-500 мб (декаметры) над Индией для **27.02.2013 (слева)** и **01.03.2013 (справа)**

[https://fluid.nccs.nasa.gov/reanalysis/classic\\_merra2/?stream=MERRA2&field=precip&level=0&region=nasia&tau=00&track=none&fcst=20180430](https://fluid.nccs.nasa.gov/reanalysis/classic_merra2/?stream=MERRA2&field=precip&level=0&region=nasia&tau=00&track=none&fcst=20180430)

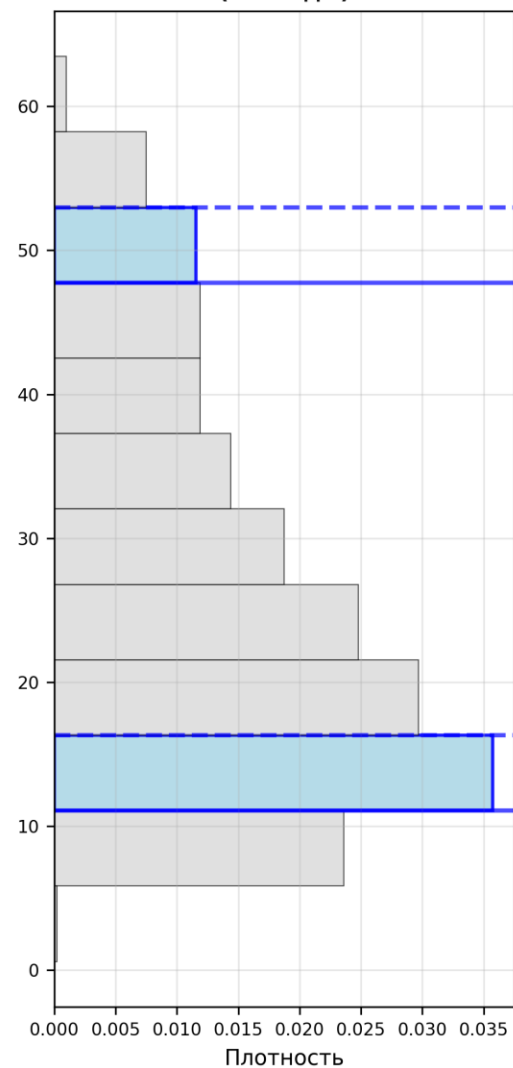


# Анализ ИВА для 8 региона, 2017 г.

Регион 8, 2017 год, граница Пакистана с Индией

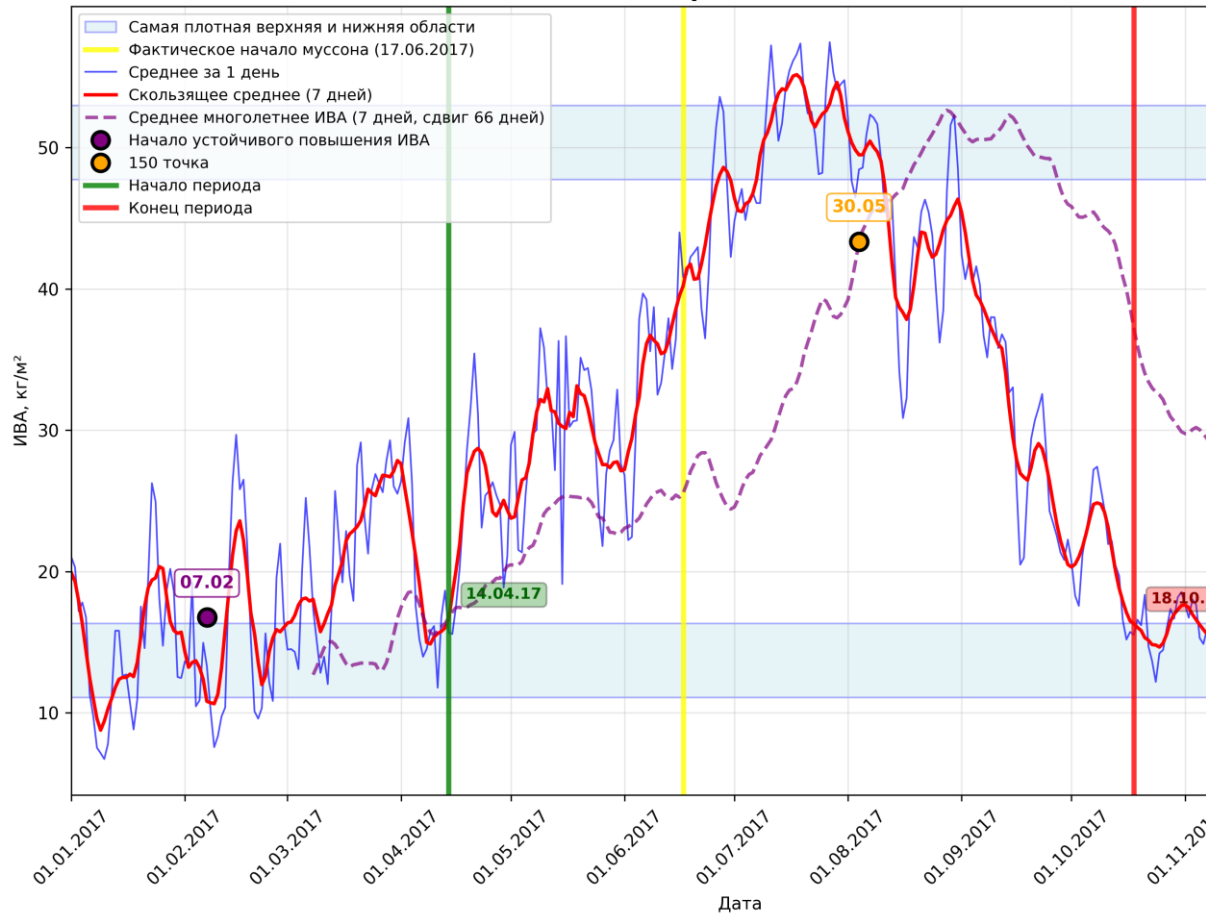


Общая гистограмма (все годы)

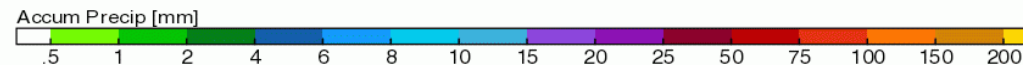
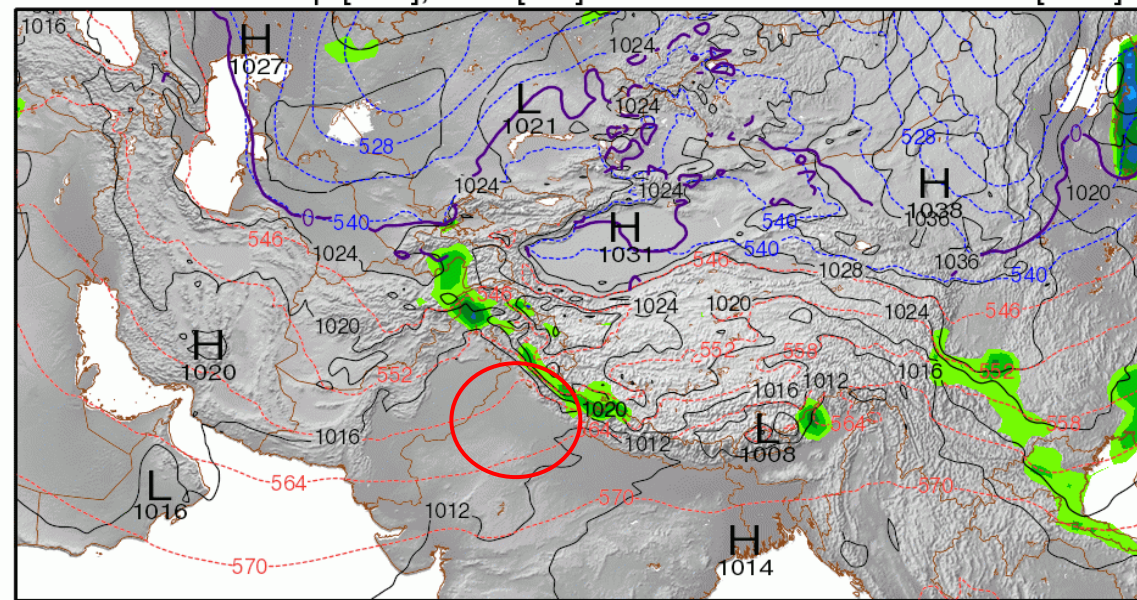


# Анализ ИВА для 8 региона, 2017 г.

Регион 8, 2017 год, граница Пакистана с Индией



Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2)  
3-hr Accum Precip [mm], SLP [mb] and 1000-500mb Thickness [dam]



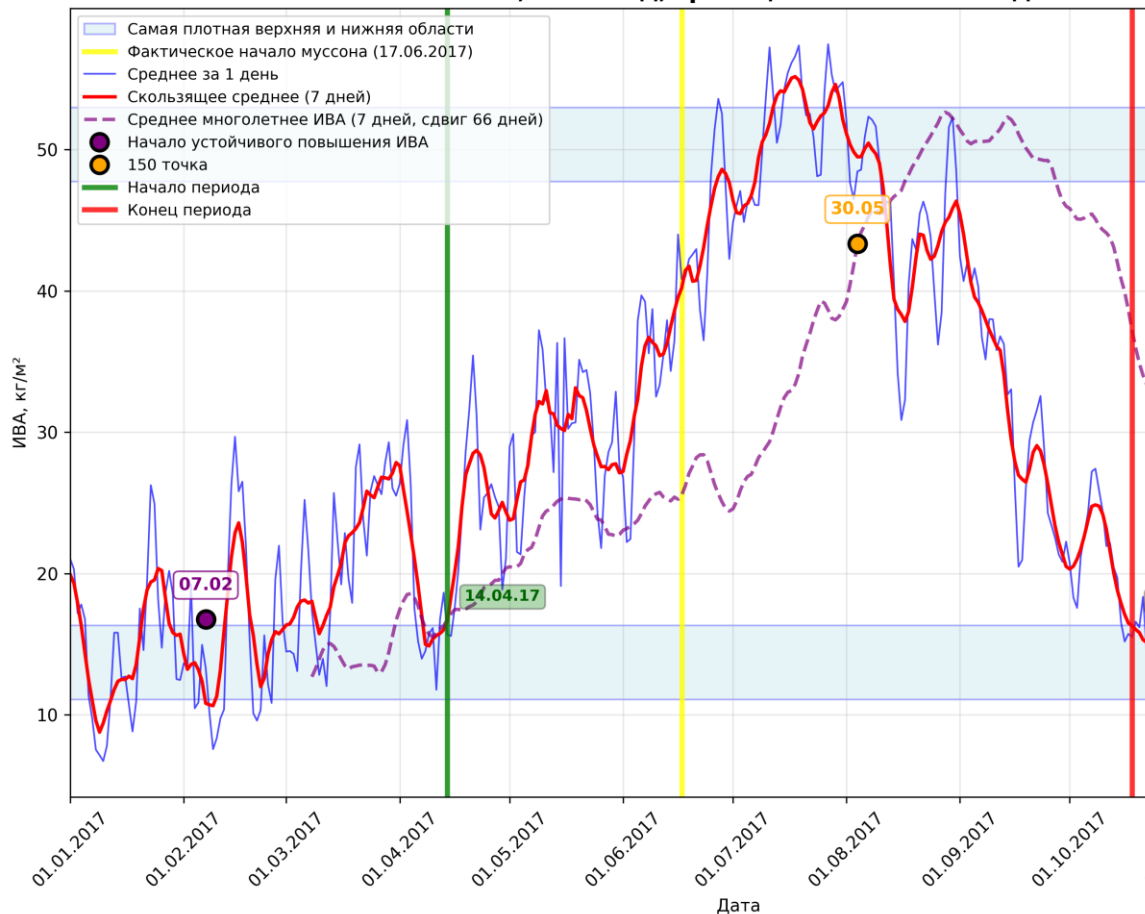
Количество осадков за 3 часа (мм), давление на уровне моря (мб) и давление в слое 1000-500 мб (декаметры) над Индией

01.03.2017-30.03.2017

[https://fluid.nccs.nasa.gov/reanalysis/classic\\_merra2/?stream=MERRA2&field=precip&level=0&region=nasia&tau=00&track=none&fcst=20180430](https://fluid.nccs.nasa.gov/reanalysis/classic_merra2/?stream=MERRA2&field=precip&level=0&region=nasia&tau=00&track=none&fcst=20180430)

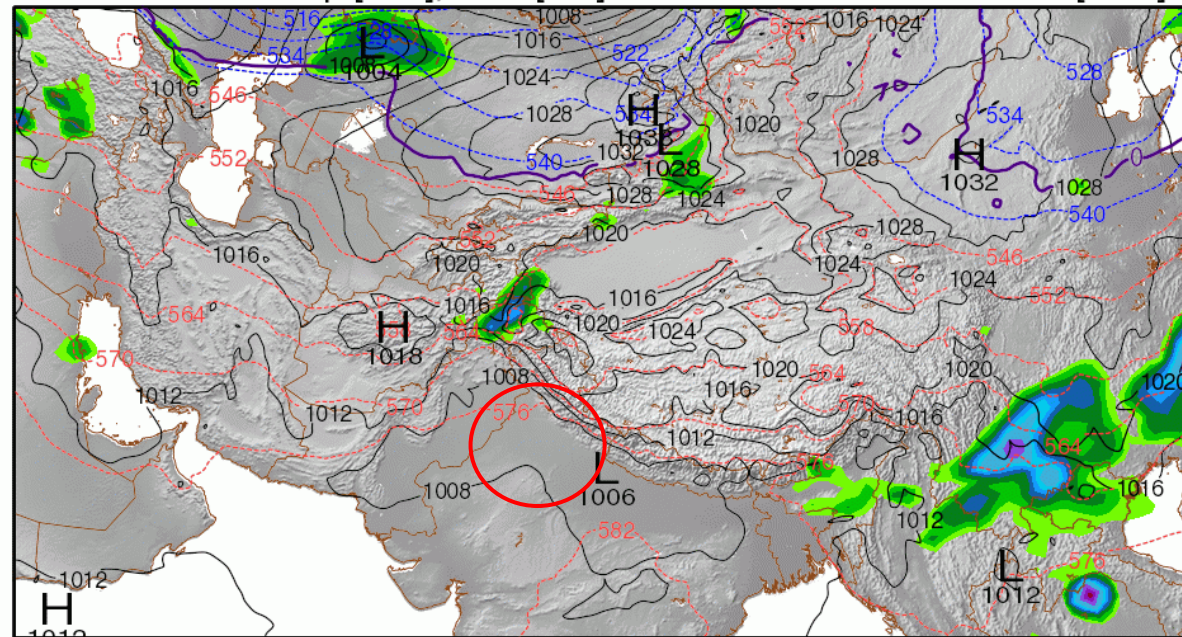
# Анализ ИВА для 8 региона, 2017 г.

Регион 8, 2017 год, граница Пакистана с Индией



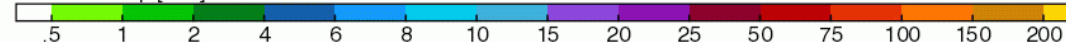
Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2)

3-hr Accum Precip [mm], SLP [mb] and 1000-500mb Thickness [dam]



Fri 03/31/2017 00Z

Accum Precip [mm]



слое 1000-500 мб (декаметры) над Индией

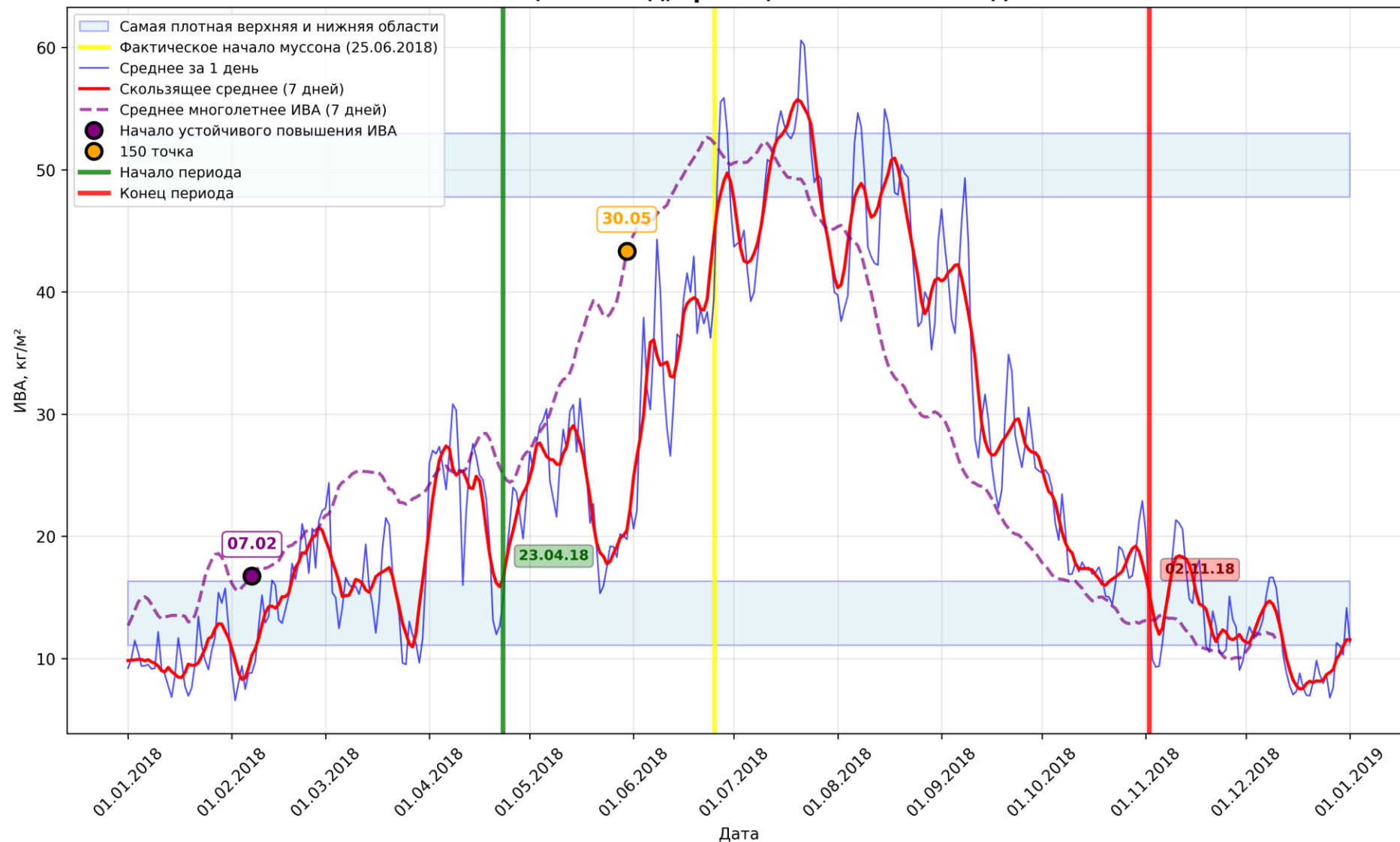
31.03.2017-15.04.2017

[https://fluid.nccs.nasa.gov/reanalysis/classic\\_merra2/?stream=MERRA2&field=precip&level=0&region=nasia&tau=00&track=none&fcst=20180430](https://fluid.nccs.nasa.gov/reanalysis/classic_merra2/?stream=MERRA2&field=precip&level=0&region=nasia&tau=00&track=none&fcst=20180430)

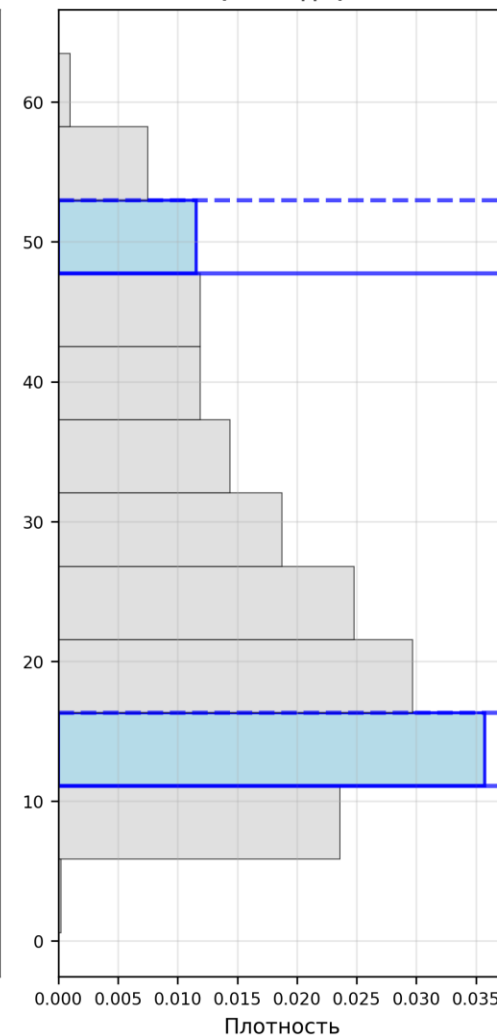


# Анализ ИВА для 8 региона, 2018 г.

Регион 8, 2018 год, граница Пакистана с Индией



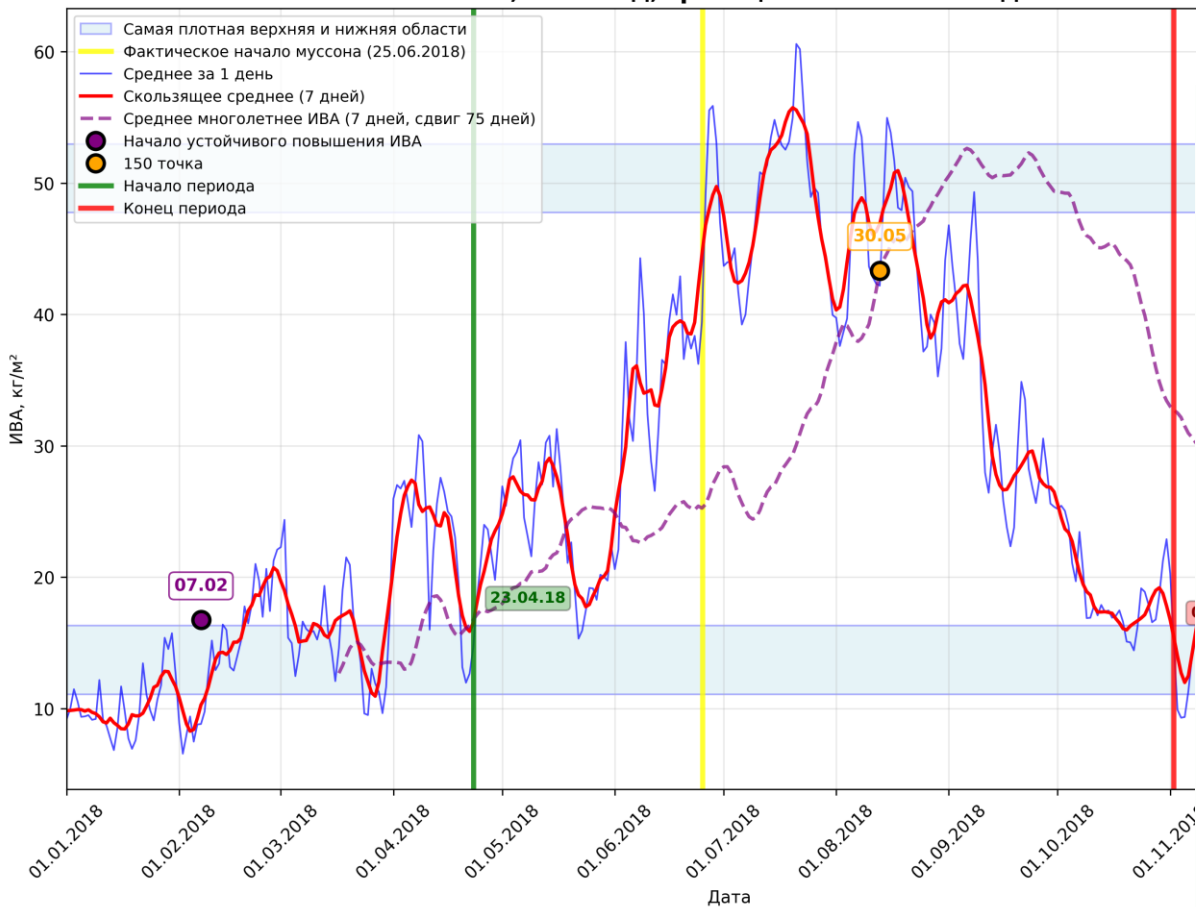
Общая гистограмма (все годы)





# Анализ ИВА для 8 региона, 2018 г.

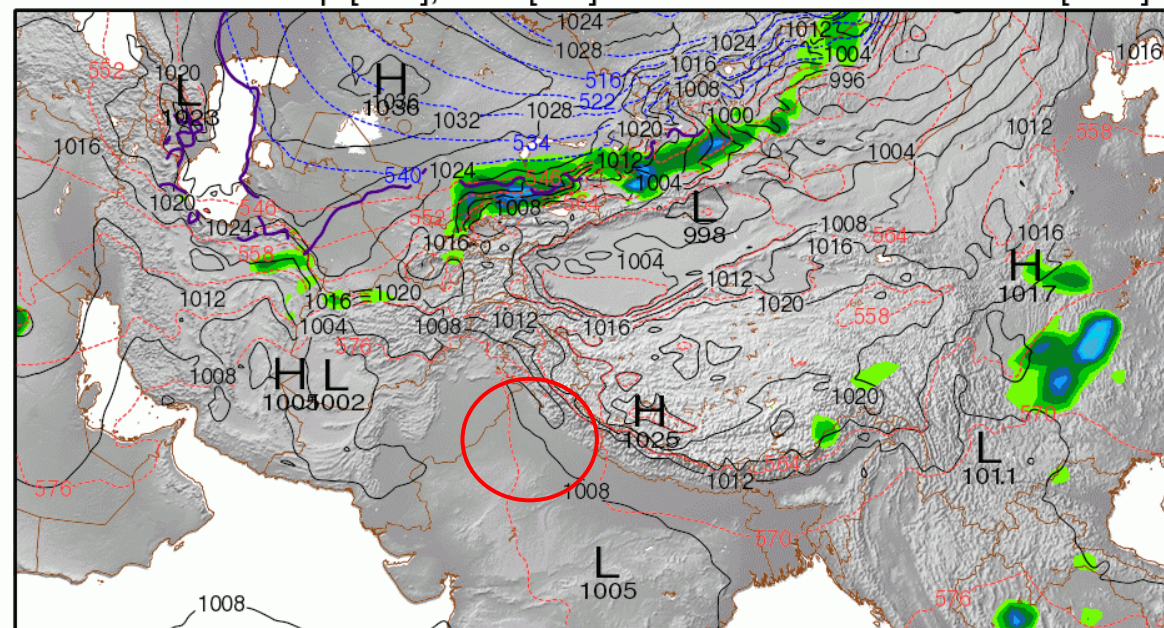
Регион 8, 2018 год, граница Пакистана с Индией



GMAO

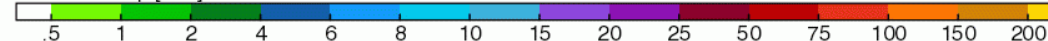
Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2)

3-hr Accum Precip [mm], SLP [mb] and 1000-500mb Thickness [dam]



Sun 04/01/2018 00Z

Accum Precip [mm]



слое 1000-500 мб (декаметры) над Индией

01.04.2018-30.04.2018

[https://fluid.nccs.nasa.gov/reanalysis/classic\\_merra2/?stream=MERRA2&field=precip&level=0&region=nasia&tau=00&track=none&fcst=20180430](https://fluid.nccs.nasa.gov/reanalysis/classic_merra2/?stream=MERRA2&field=precip&level=0&region=nasia&tau=00&track=none&fcst=20180430)



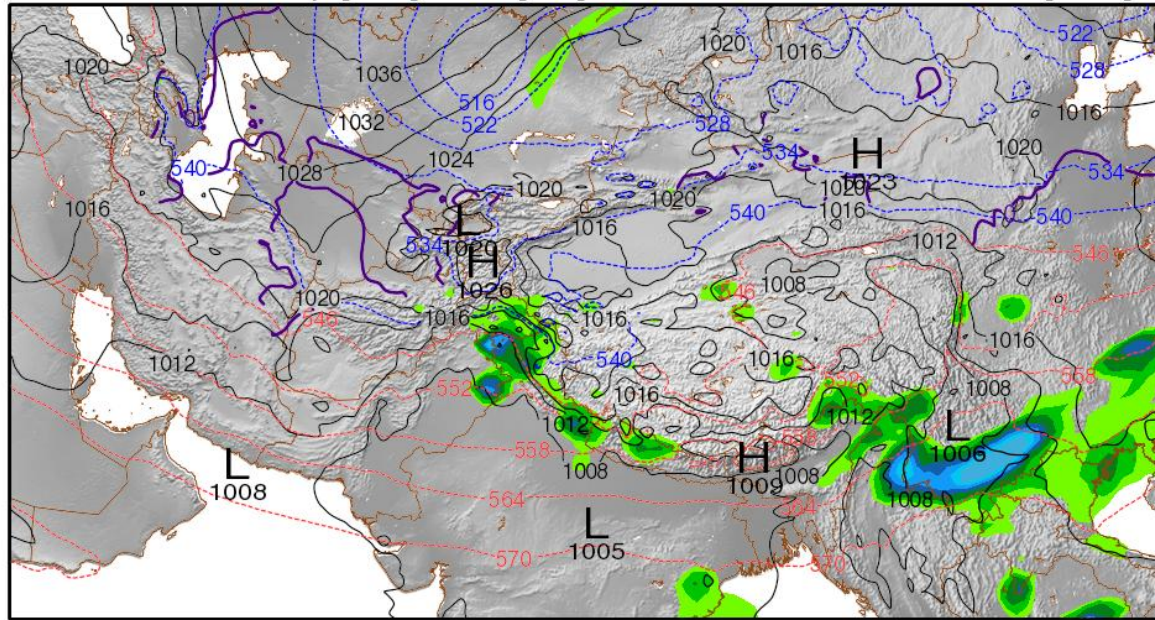
# Анализ синоптических процессов для 8 региона, 2017 г.



GMAO

Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2)

3-hr Accum Precip [mm], SLP [mb] and 1000-500mb Thickness [dam]



Thu 03/09/2017 00Z

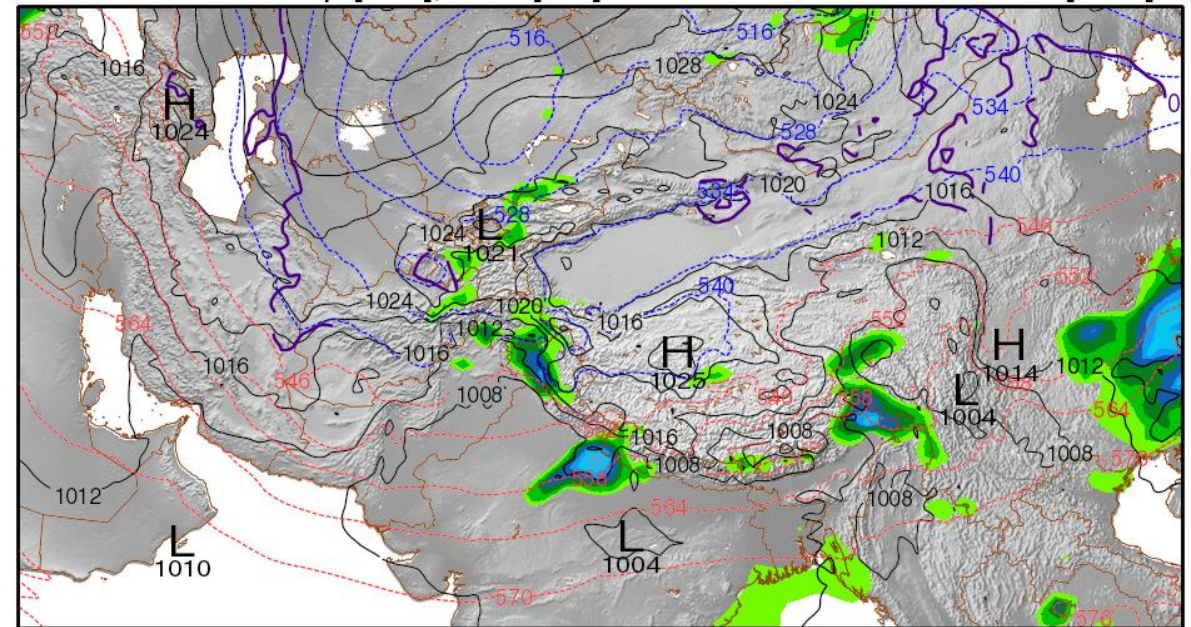
Accum Precip [mm]



GMAO

Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2)

3-hr Accum Precip [mm], SLP [mb] and 1000-500mb Thickness [dam]



Fri 03/10/2017 00Z

Accum Precip [mm]



Количество осадков за 3 часа (мм), давление на уровне моря (мб) и давление в слое 1000-500 мб (декаметры) над Индией  
для **09.03.2017 (слева)** и **10.03.2017 (справа)**

[https://fluid.nccs.nasa.gov/reanalysis/classic\\_merra2/?stream=MERRA2&field=precip&level=0&region=nasia&tau=00&track=none&fcst=20180430](https://fluid.nccs.nasa.gov/reanalysis/classic_merra2/?stream=MERRA2&field=precip&level=0&region=nasia&tau=00&track=none&fcst=20180430)

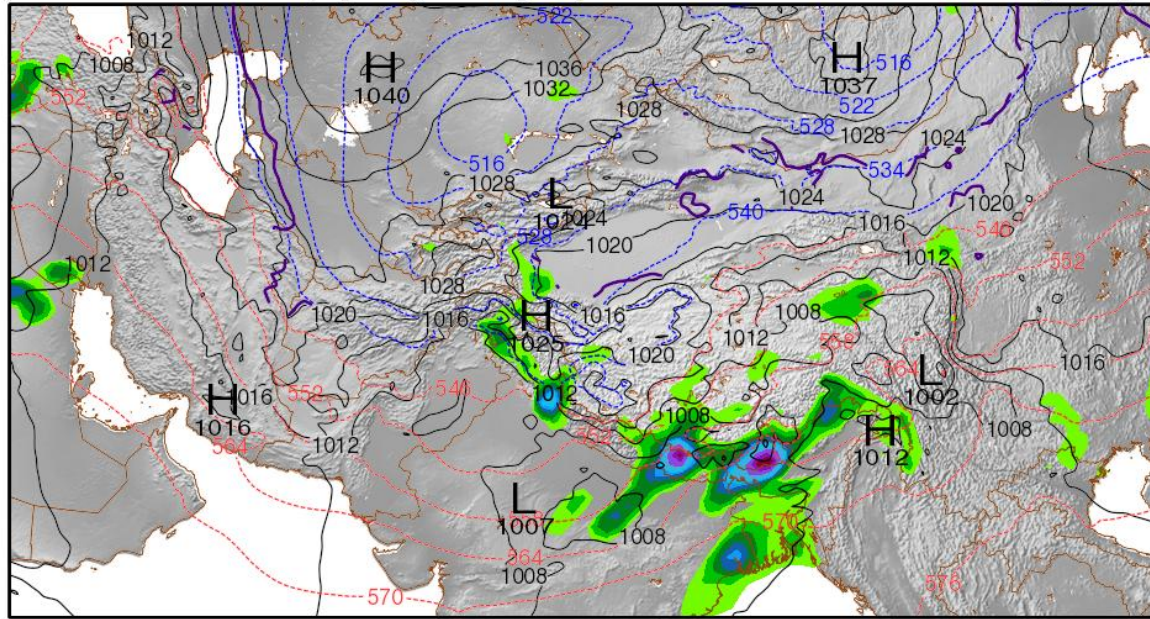


# Анализ синоптических процессов для 8 региона, 2017 г.

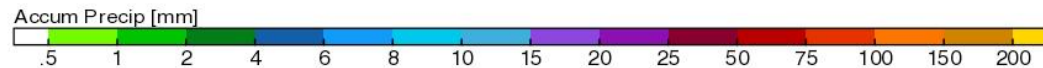


Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2)

3-hr Accum Precip [mm], SLP [mb] and 1000-500mb Thickness [dam]



Sat 03/11/2017 00Z

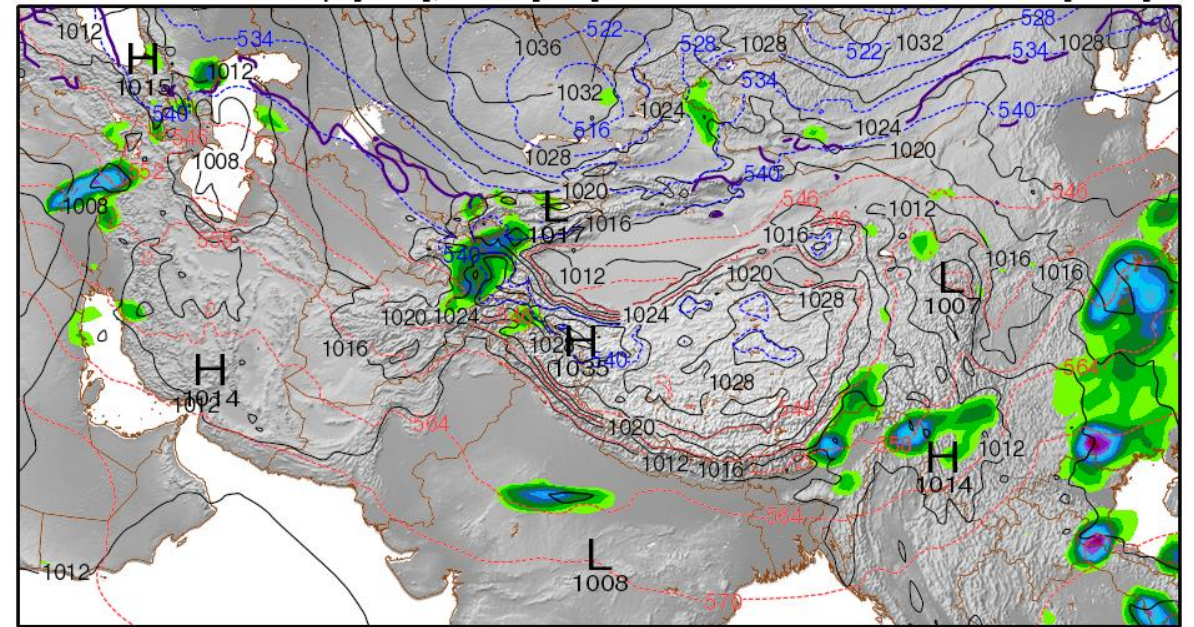


GMAO

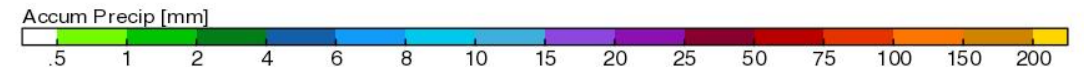


Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2)

3-hr Accum Precip [mm], SLP [mb] and 1000-500mb Thickness [dam]



Sun 03/19/2017 00Z



GMAO

Количество осадков за 3 часа (мм), давление на уровне моря (мб) и давление в слое 1000-500 мб (декаметры) над Индией для 11.03.2017 (слева) и 19.03.2017 (справа)

[https://fluid.nccs.nasa.gov/reanalysis/classic\\_merra2/?stream=MERRA2&field=precip&level=0&region=nasia&tau=00&track=none&fcst=20180430](https://fluid.nccs.nasa.gov/reanalysis/classic_merra2/?stream=MERRA2&field=precip&level=0&region=nasia&tau=00&track=none&fcst=20180430)



# Анализ синоптических процессов для 8 региона, 2017 г.



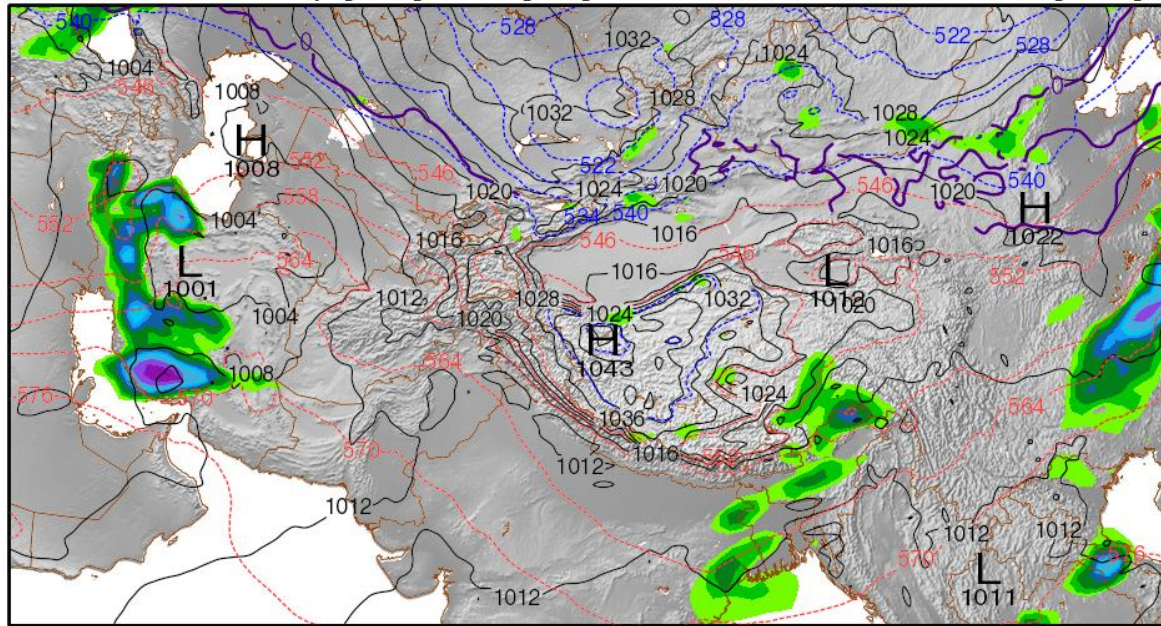
GMAO



GMAO

Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2)

3-hr Accum Precip [mm], SLP [mb] and 1000-500mb Thickness [dam]



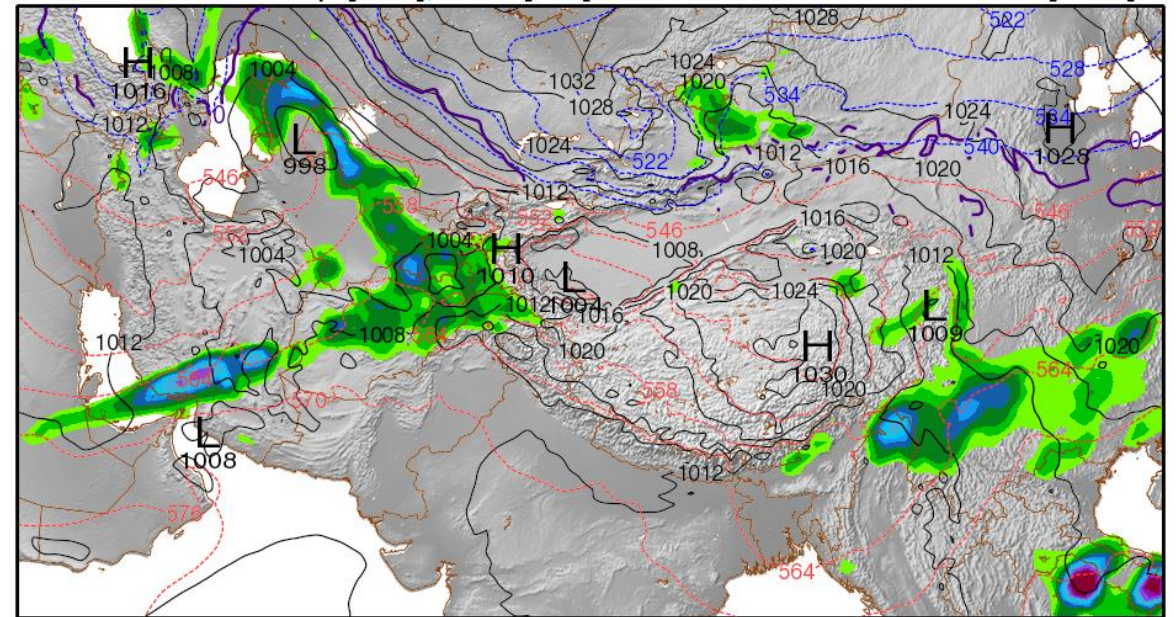
Mon 03/20/2017 00Z

Accum Precip [mm]



Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2)

3-hr Accum Precip [mm], SLP [mb] and 1000-500mb Thickness [dam]



Tue 03/21/2017 00Z

Accum Precip [mm]

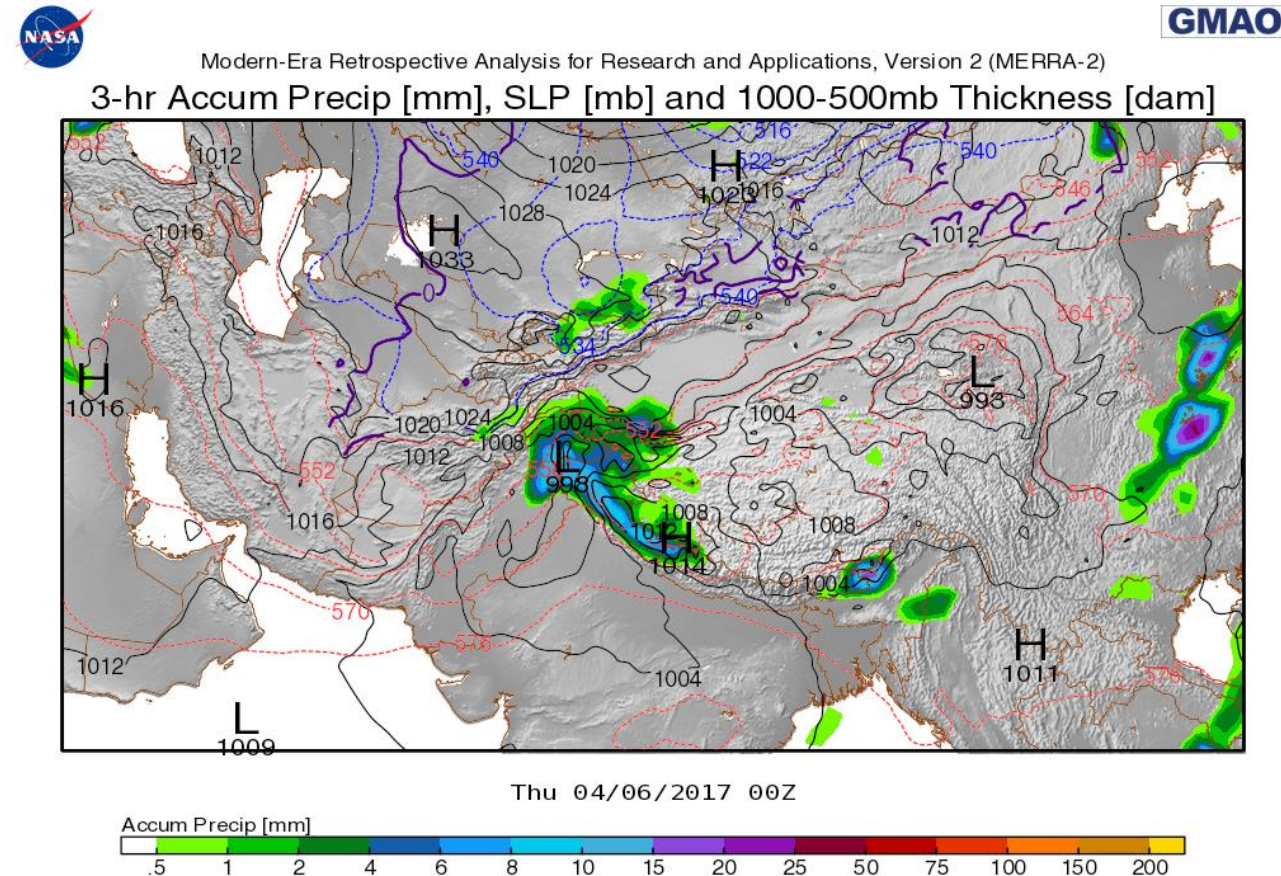
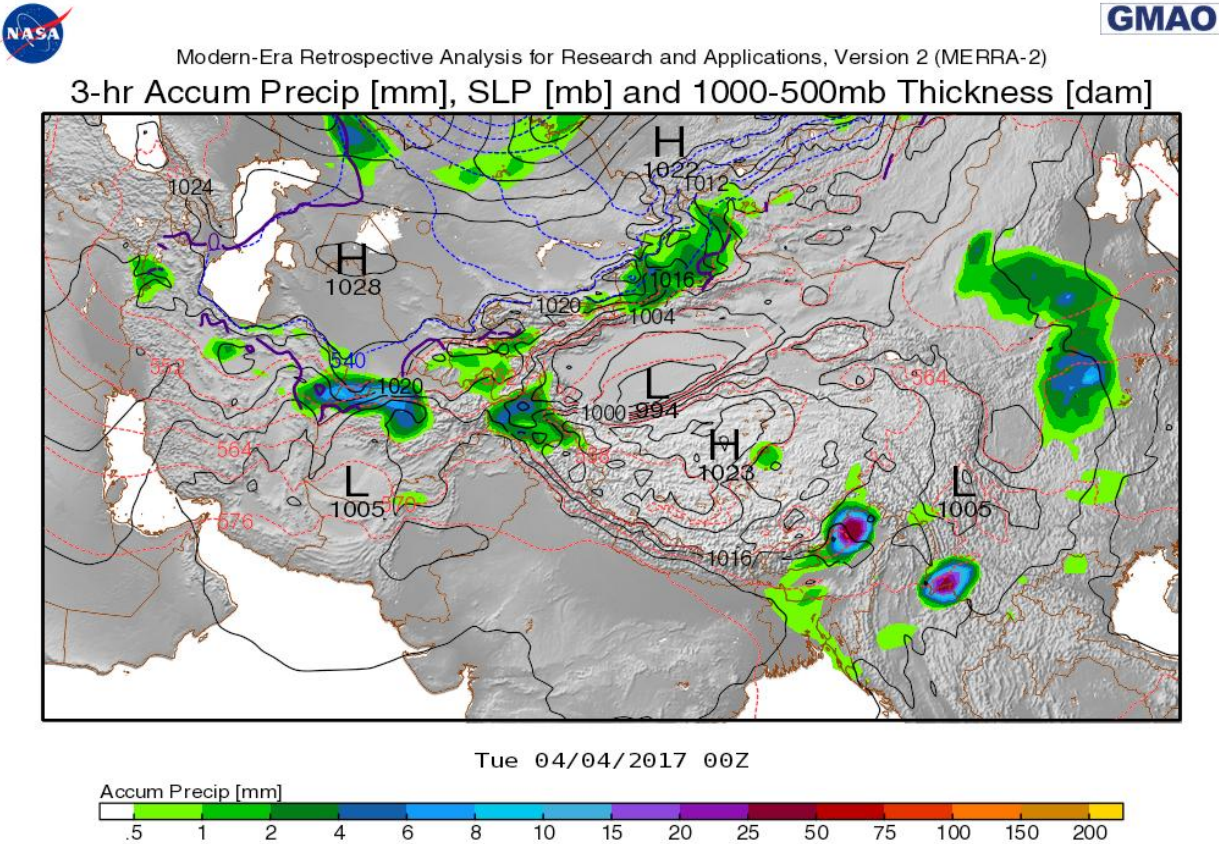


Количество осадков за 3 часа (мм), давление на уровне моря (мб) и давление в слое 1000-500 мб (декаметры) над Индией  
для **20.03.2017** (слева) и **21.03.2017** (справа)

[https://fluid.nccs.nasa.gov/reanalysis/classic\\_merra2/?stream=MERRA2&field=precip&level=0&region=nasia&tau=00&track=none&fcst=20180430](https://fluid.nccs.nasa.gov/reanalysis/classic_merra2/?stream=MERRA2&field=precip&level=0&region=nasia&tau=00&track=none&fcst=20180430)



# Анализ синоптических процессов для 8 региона, 2017 г.



Количество осадков за 3 часа (мм), давление на уровне моря (мб) и давление в слое 1000-500 мб (декаметры) над Индией  
для **04.04.2017** (слева) и **06.04.2017** (справа)

[https://fluid.nccs.nasa.gov/reanalysis/classic\\_merra2/?stream=MERRA2&field=precip&level=0&region=nasia&tau=00&track=none&fcst=20180430](https://fluid.nccs.nasa.gov/reanalysis/classic_merra2/?stream=MERRA2&field=precip&level=0&region=nasia&tau=00&track=none&fcst=20180430)

# Заключение

- В рамках исследования продемонстрирован подход к определению даты начала летнего индийского муссона. Анализ проводился за 2012-2021 гг. для 11 регионов и детально представлен 8 регион.

Рассмотрены типичные иллюстративные примеры:

Высокая точность: в 3 случаях (2013, 2016, 2019 гг.) метод показал практически идеальное совпадение с фиксированной точкой шаблона после его сдвига (расхождение составило  $\pm 1$  день). В 3 случаях (2012, 2014, 2020 гг.) расхождение оказалось небольшим (+5, -5 и +7 дней соответственно).

Умеренная точность: для 2015 года расхождение составило +14 дней.

Низкая точность: в 3 случаях (2017, 2018, 2021 гг.) были зафиксированы значительные расхождения — от 1,5 до 2,5 месяцев.

- Большинство зон осадков с запада не могут сместиться на территорию Индии при достижении гор Пакистана. Нередко обширные зоны осадков огибают Индию по Гималаям, не затрагивая центральные и южные регионы. Потому для большей части Индии характерна устойчивая сухая погода в этот период. Помимо основных фронтов, осадки могут формироваться локально, в частности, на восточном побережье Индии вблизи Бенгальского залива, но они обычно менее интенсивны и продолжительны по сравнению с циклонами, приходящими с запада.
- Рассчитанные оценки для прогнозирования даты начала летнего муссона демонстрируют значительную межгодовую изменчивость, варьируясь от начала марта (2013, 2016, 2019) до середины-конца апреля (2017, 2018). Такая разница в прогнозной дате частично может быть связана с синоптической активностью: раннему началу способствовала более активная и проникающая на индийскую территорию циклоническая деятельность с запада, в то время как позднему началу предшествовали длительные периоды с преобладанием сухой погоды над Индией, несмотря на осадки в горных регионах.

Основная причина погрешностей в оценках — резкое понижения значений ИВА в исходных данных с их последующим повышением. Такие колебания приводили к значительному смещению прогнозируемой даты начала муссона, что доказывает необходимость корректировать алгоритм в дальнейшем.

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.