

«Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»  
ИКИ РАН

# Анализ многолетней крупномасштабной динамики интегрального влагосодержания атмосферы в период летнего Индийского муссона

Головко А.Г.<sup>1</sup>, Ермаков Д.М.<sup>2, 3</sup>, Кузьмин А.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), Санкт-Петербург, Россия

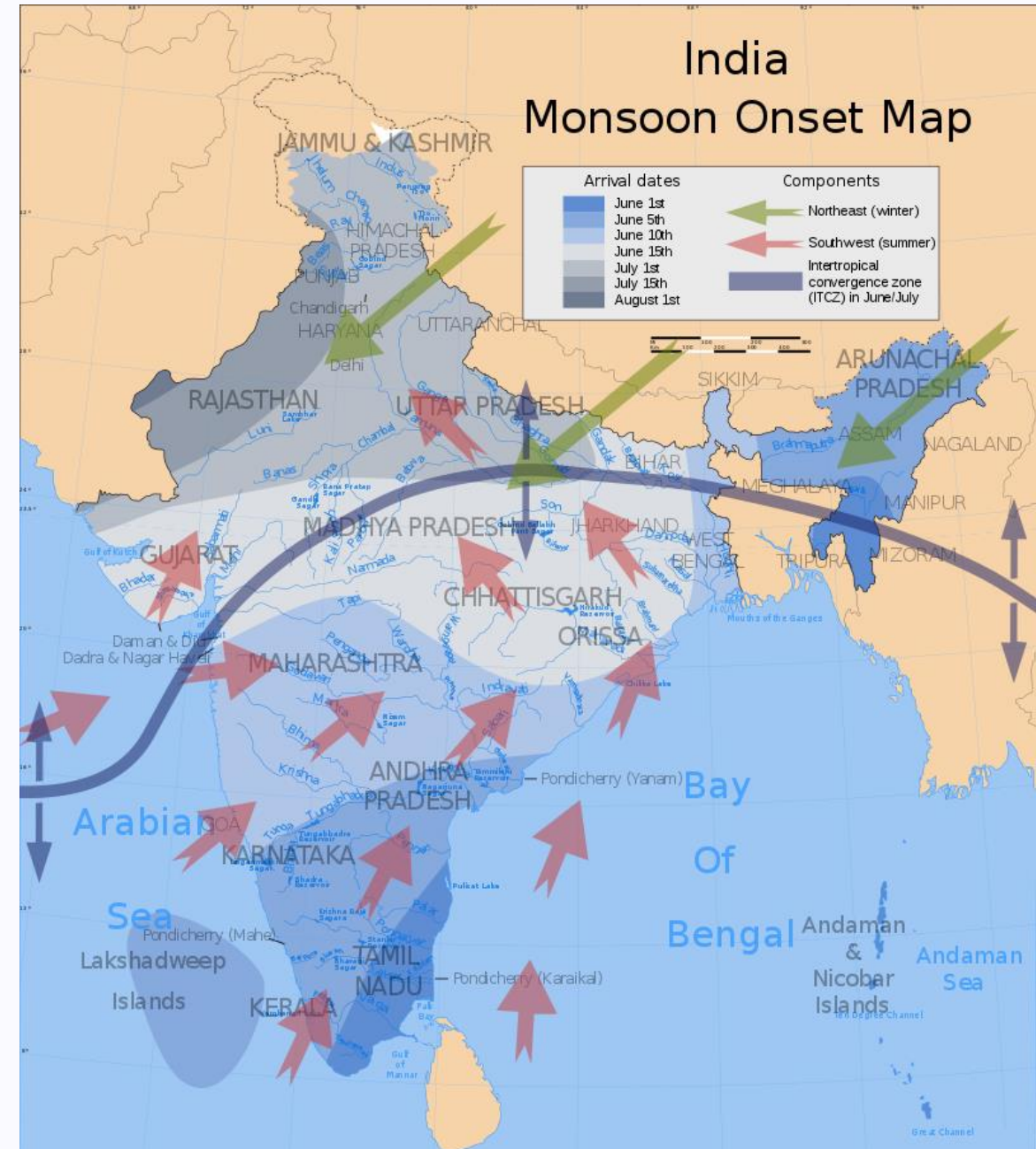
<sup>2</sup> Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup> Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал (ФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН), Фрязино, Московская область, Россия

Москва  
2024

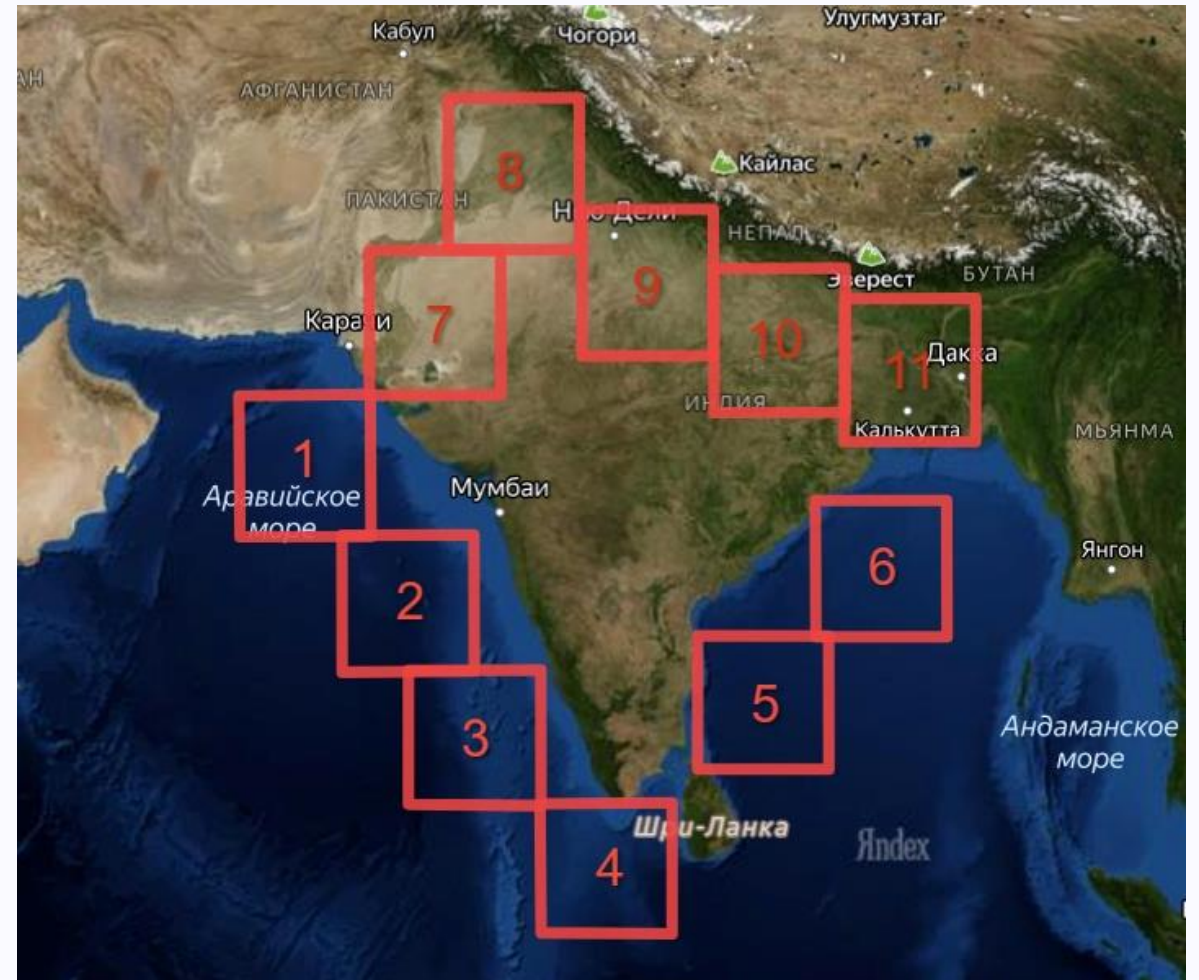
# Актуальность

- Муссон влияет на всю инфраструктуру сельского хозяйства и связанных с ним отраслей Индии и других близлежащих стран. Для производства сельскохозяйственной продукции критически важно **знать заранее сроки начала и конца муссонного периода.**
- В последние десятилетия появилась возможность по спутниковым данным радиотеплового зондирования Земли восстанавливать **поля интегральных по высоте полей интегрального влагосодержания атмосферы (ИВА).**
- Принципиальную роль играет **пространственно-временное** распределение водяного пара в атмосфере Земли.
- Рассмотрена динамика интегрального влагосодержания в 11 районах близ Индийского полуострова: в Аравийском море и Бенгальском заливе **с 2012 по 2023 гг.** и проанализированы временные характеристики муссонного периода.



# Область исследования

Районы представляют собой квадрат  $3^{\circ} \times 3^{\circ}$ , расположенные над северной частью Индийского океана, полуостровом Индостан, в восточной части Аравийского моря и западной — Бенгальского залива.



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 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 2023 гг.

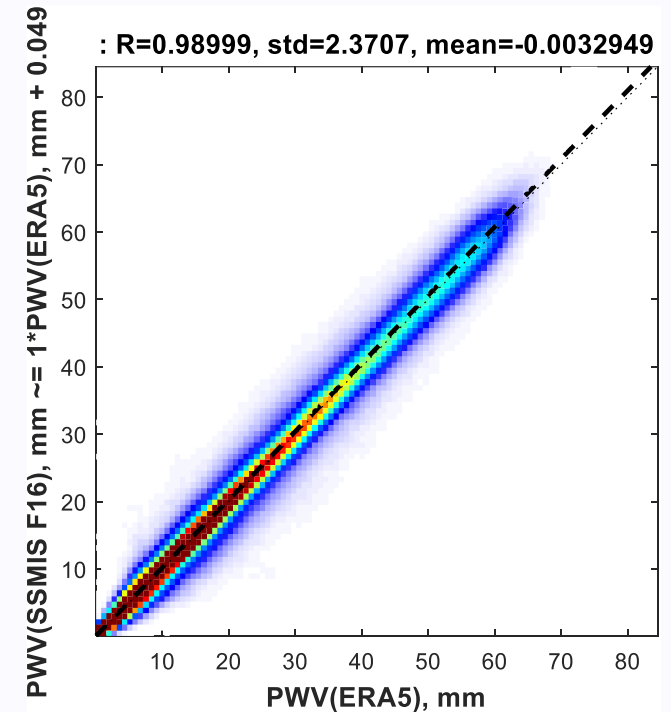
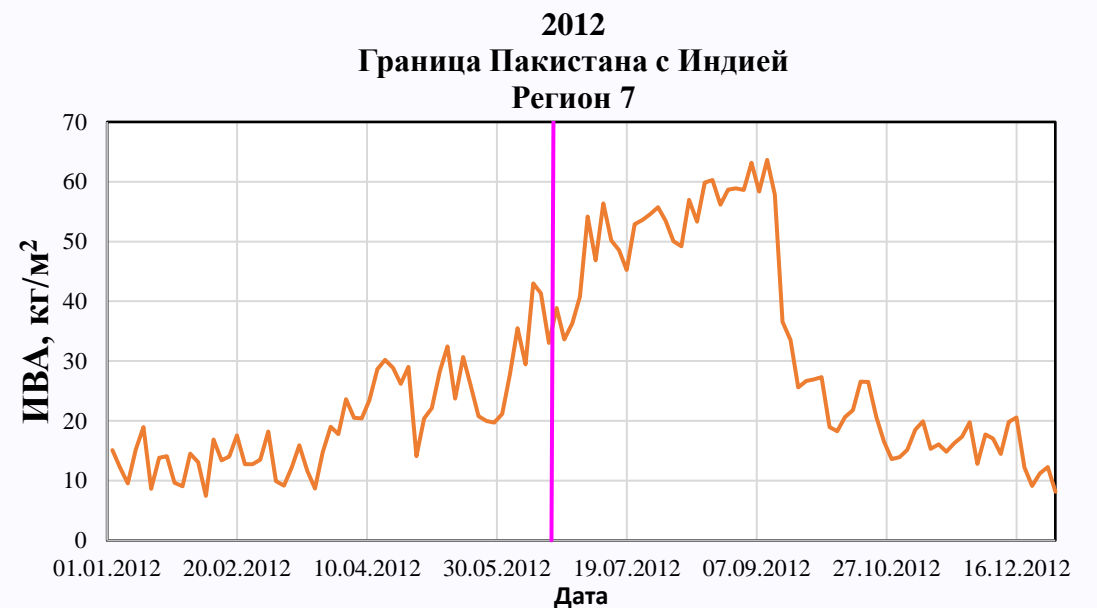
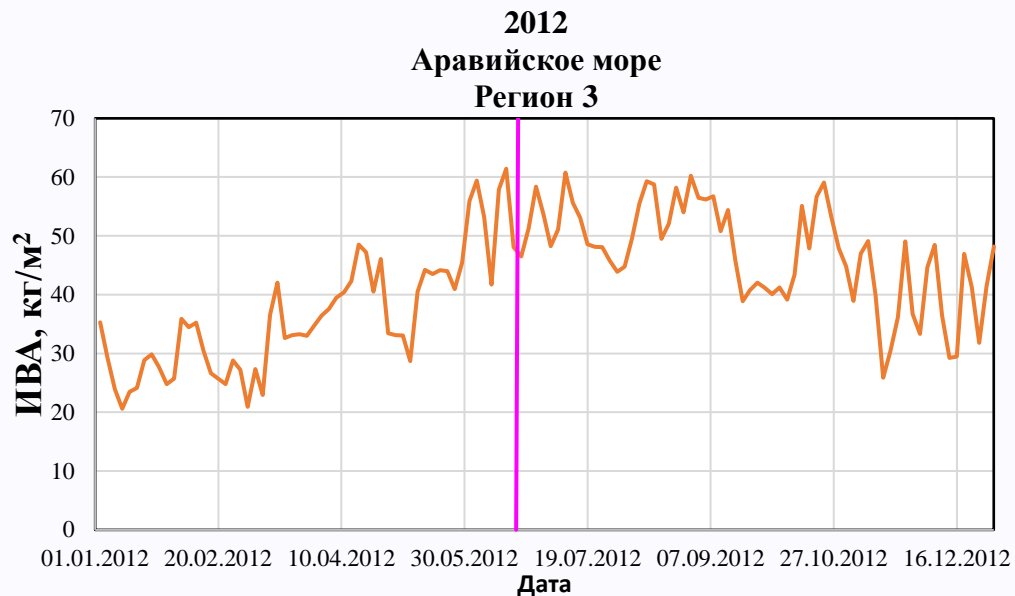
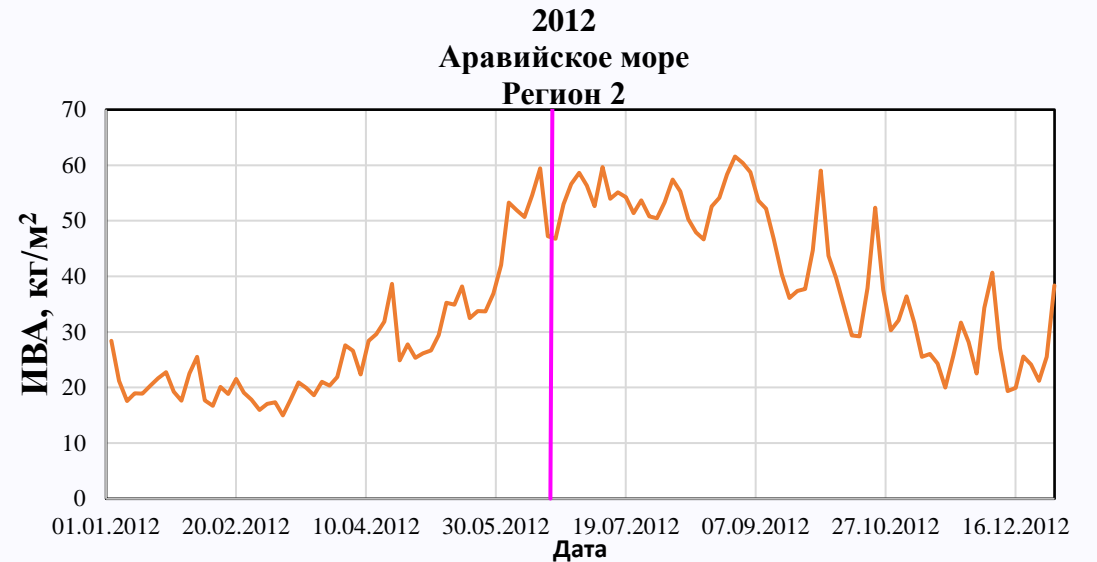
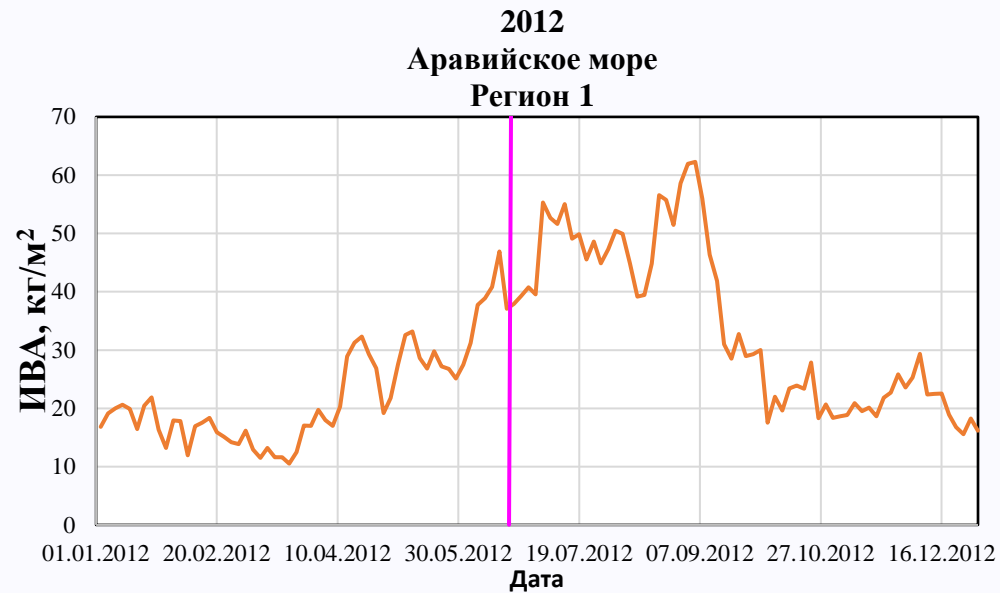


Диаграмма рассеяния PWV, восстановленного по данным SSMIS F16, и PWV по данным реанализа ECMWF Era 5 за 2020 год над всем Земным шаром

# Содержание ИВА для регионов 1, 2, 3, 7 для 2012 г.



# Корреляционная матрица для регионов 1-11 за период 2012-2023 гг.

Корреляционная матрица для регионов 1-11 за период 2012-2023

|    | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     | 11     |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1  | 1      | 0,8539 | 0,6152 | 0,3037 | 0,6543 | 0,7744 | 0,9315 | 0,8747 | 0,8832 | 0,8593 | 0,8262 |
| 2  | 0,8539 | 1      | 0,7365 | 0,4534 | 0,7757 | 0,8222 | 0,7822 | 0,7492 | 0,794  | 0,8177 | 0,8206 |
| 3  | 0,6152 | 0,7365 | 1      | 0,5993 | 0,7414 | 0,7159 | 0,587  | 0,5842 | 0,6145 | 0,6515 | 0,691  |
| 4  | 0,3037 | 0,4534 | 0,5993 | 1      | 0,6474 | 0,4478 | 0,2695 | 0,2679 | 0,2767 | 0,3122 | 0,3674 |
| 5  | 0,6543 | 0,7757 | 0,7414 | 0,6474 | 1      | 0,8801 | 0,6149 | 0,6014 | 0,6472 | 0,6937 | 0,7285 |
| 6  | 0,7744 | 0,8222 | 0,7159 | 0,4478 | 0,8801 | 1      | 0,76   | 0,751  | 0,7957 | 0,8479 | 0,8955 |
| 7  | 0,9315 | 0,7822 | 0,587  | 0,2695 | 0,6149 | 0,76   | 1      | 0,9646 | 0,9441 | 0,8902 | 0,8458 |
| 8  | 0,8747 | 0,7492 | 0,5842 | 0,2679 | 0,6014 | 0,751  | 0,9646 | 1      | 0,9521 | 0,8954 | 0,8533 |
| 9  | 0,8832 | 0,794  | 0,6145 | 0,2767 | 0,6472 | 0,7957 | 0,9441 | 0,9521 | 1      | 0,9652 | 0,9037 |
| 10 | 0,8593 | 0,8177 | 0,6515 | 0,3122 | 0,6937 | 0,8479 | 0,8902 | 0,8954 | 0,9652 | 1      | 0,9636 |
| 11 | 0,8262 | 0,8206 | 0,691  | 0,3674 | 0,7285 | 0,8955 | 0,8458 | 0,8533 | 0,9037 | 0,9636 | 1      |

|        |   |
|--------|---|
| 0,8539 | высокая корреляция, но регионы соседние |
| 0,7744 | высокая корреляция, регионы не граничат |

|                           |
|---------------------------|
| 0,7–0,9 — высокая         |
| 0,9–0,99 — весьма высокая |

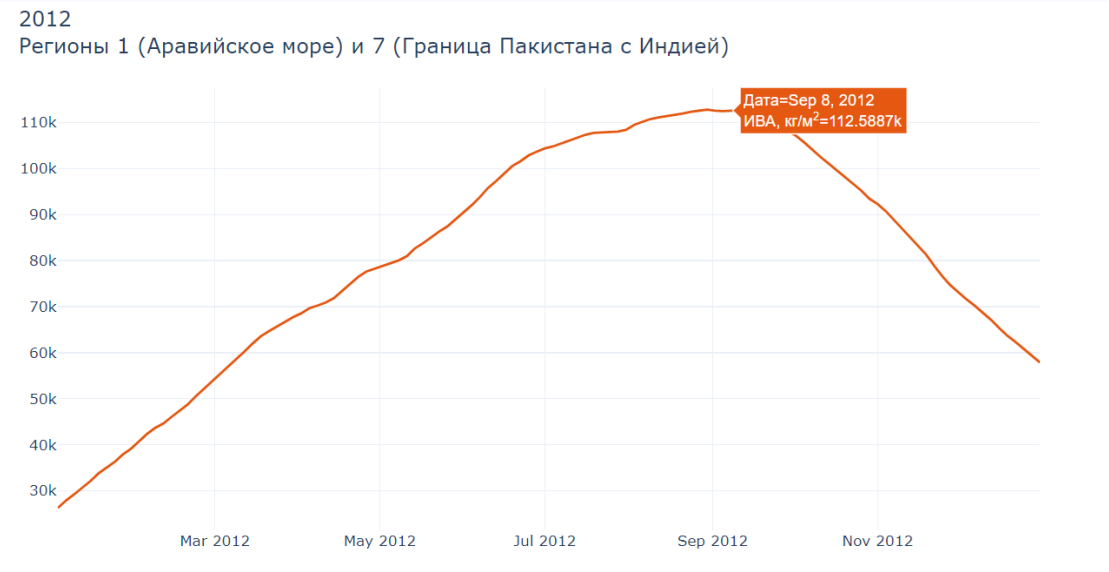
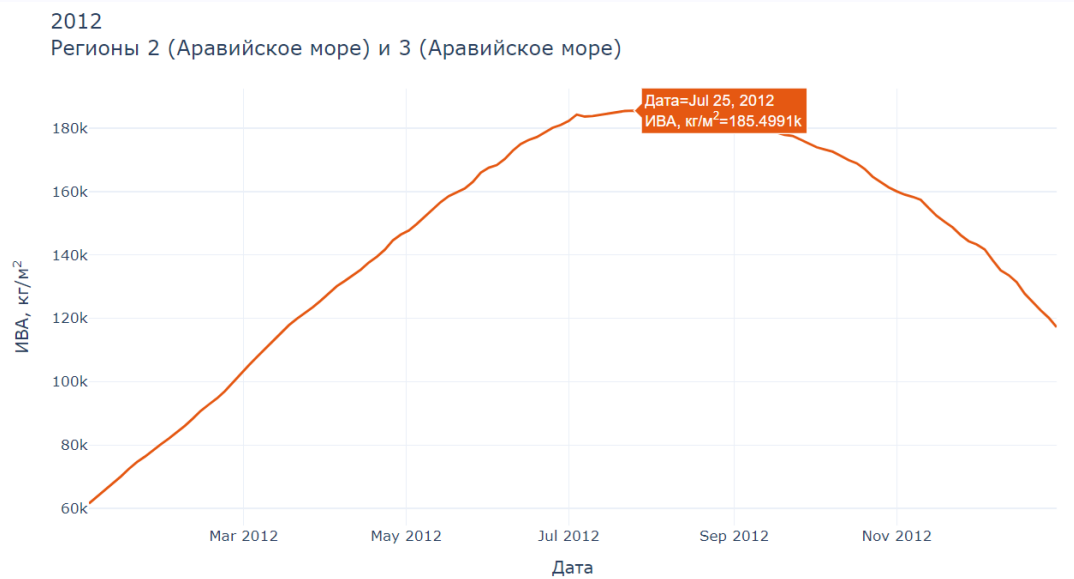
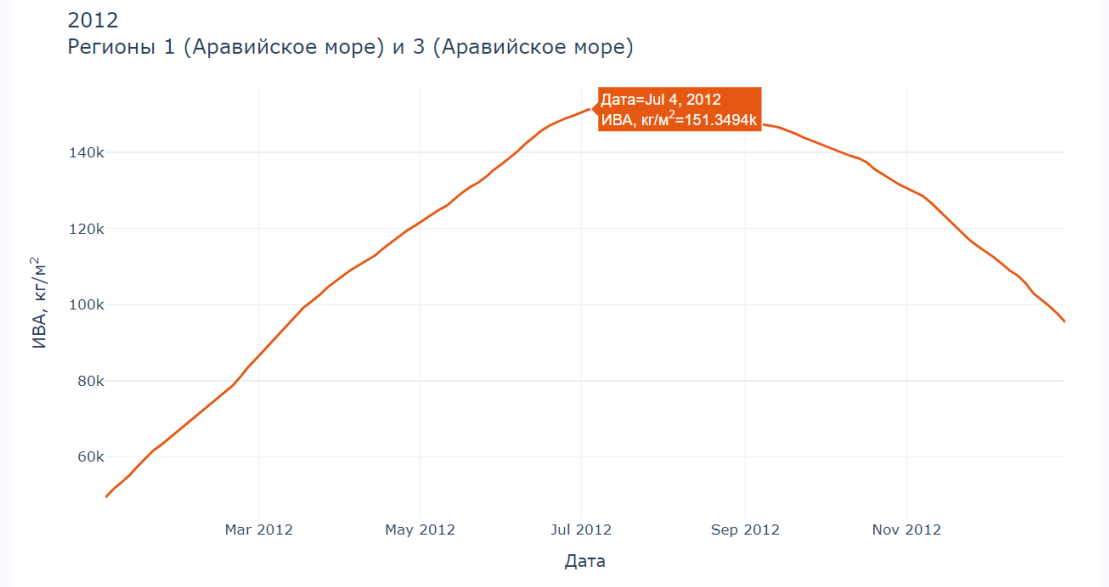
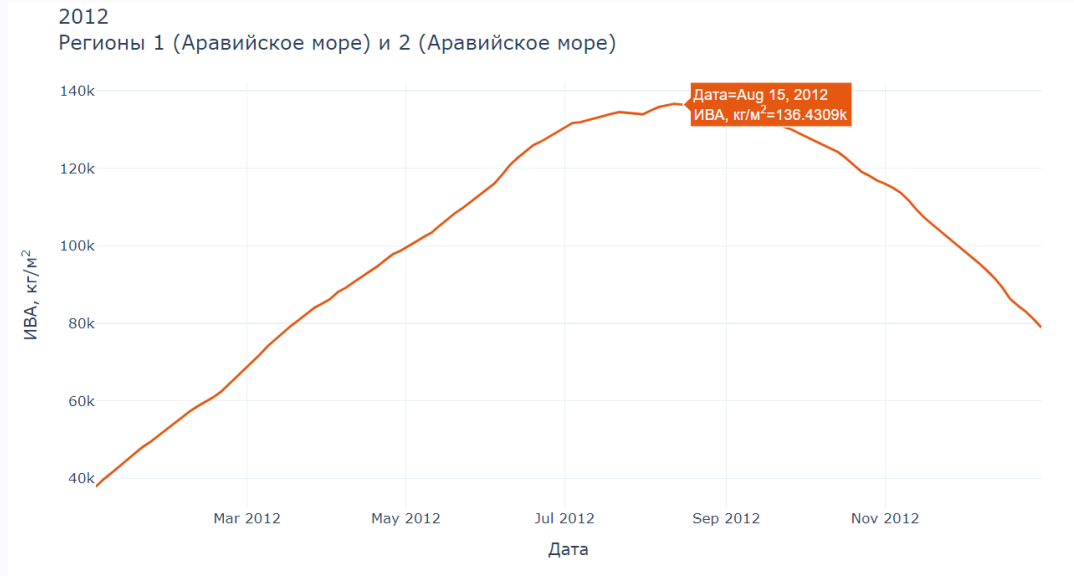
# Корреляционная матрица для регионов 1-11 для 2013 г.

| Корреляционная матрица для регионов 1-11 за 2013 г. |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|   | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     | 11     |
| 1   | 1      | 0,8982 | 0,6683 | 0,2936 | 0,6955 | 0,8003 | 0,9371 | 0,8947 | 0,9084 | 0,9009 | 0,8785 |
| 2   | 0,8982 | 1      | 0,8302 | 0,4253 | 0,7748 | 0,8504 | 0,8335 | 0,8128 | 0,8678 | 0,8984 | 0,8965 |
| 3   | 0,6683 | 0,8302 | 1      | 0,6948 | 0,7377 | 0,7138 | 0,5948 | 0,5936 | 0,6315 | 0,6853 | 0,7318 |
| 4   | 0,2936 | 0,4253 | 0,6948 | 1      | 0,6062 | 0,4816 | 0,2183 | 0,2196 | 0,2329 | 0,2894 | 0,387  |
| 5   | 0,6955 | 0,7748 | 0,7377 | 0,6062 | 1      | 0,9154 | 0,6444 | 0,6122 | 0,6422 | 0,675  | 0,7192 |
| 6   | 0,8003 | 0,8504 | 0,7138 | 0,4816 | 0,9154 | 1      | 0,7727 | 0,7462 | 0,7844 | 0,8193 | 0,8627 |
| 7   | 0,9371 | 0,8335 | 0,5948 | 0,2183 | 0,6444 | 0,7727 | 1      | 0,9741 | 0,9636 | 0,9234 | 0,8765 |
| 8   | 0,8947 | 0,8128 | 0,5936 | 0,2196 | 0,6122 | 0,7462 | 0,9741 | 1      | 0,963  | 0,9142 | 0,8684 |
| 9   | 0,9084 | 0,8678 | 0,6315 | 0,2329 | 0,6422 | 0,7844 | 0,9636 | 0,963  | 1      | 0,974  | 0,9178 |
| 10  | 0,9009 | 0,8984 | 0,6853 | 0,2894 | 0,675  | 0,8193 | 0,9234 | 0,9142 | 0,974  | 1      | 0,9676 |
| 11  | 0,8785 | 0,8965 | 0,7318 | 0,387  | 0,7192 | 0,8627 | 0,8765 | 0,8684 | 0,9178 | 0,9676 | 1      |

|        |   |
|--------|---|
| 0,8371 | высокая корреляция, но регионы соседние |
| 0,767  | высокая корреляция, регионы не граничат |

|                           |
|---------------------------|
| 0,7–0,9 — высокая         |
| 0,9–0,99 — весьма высокая |

# Свёртка 2х сигналов для регионов 1-2, 1-3, 2-3, 1-7 для 2012 г.



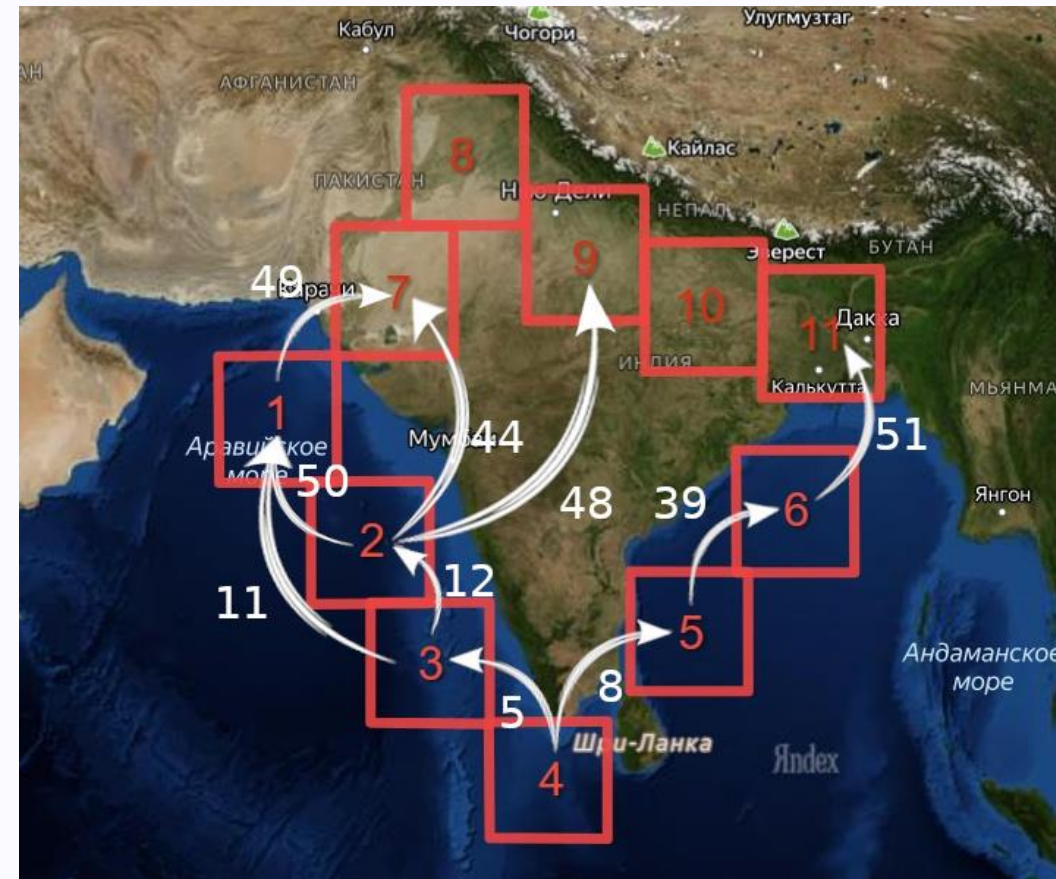
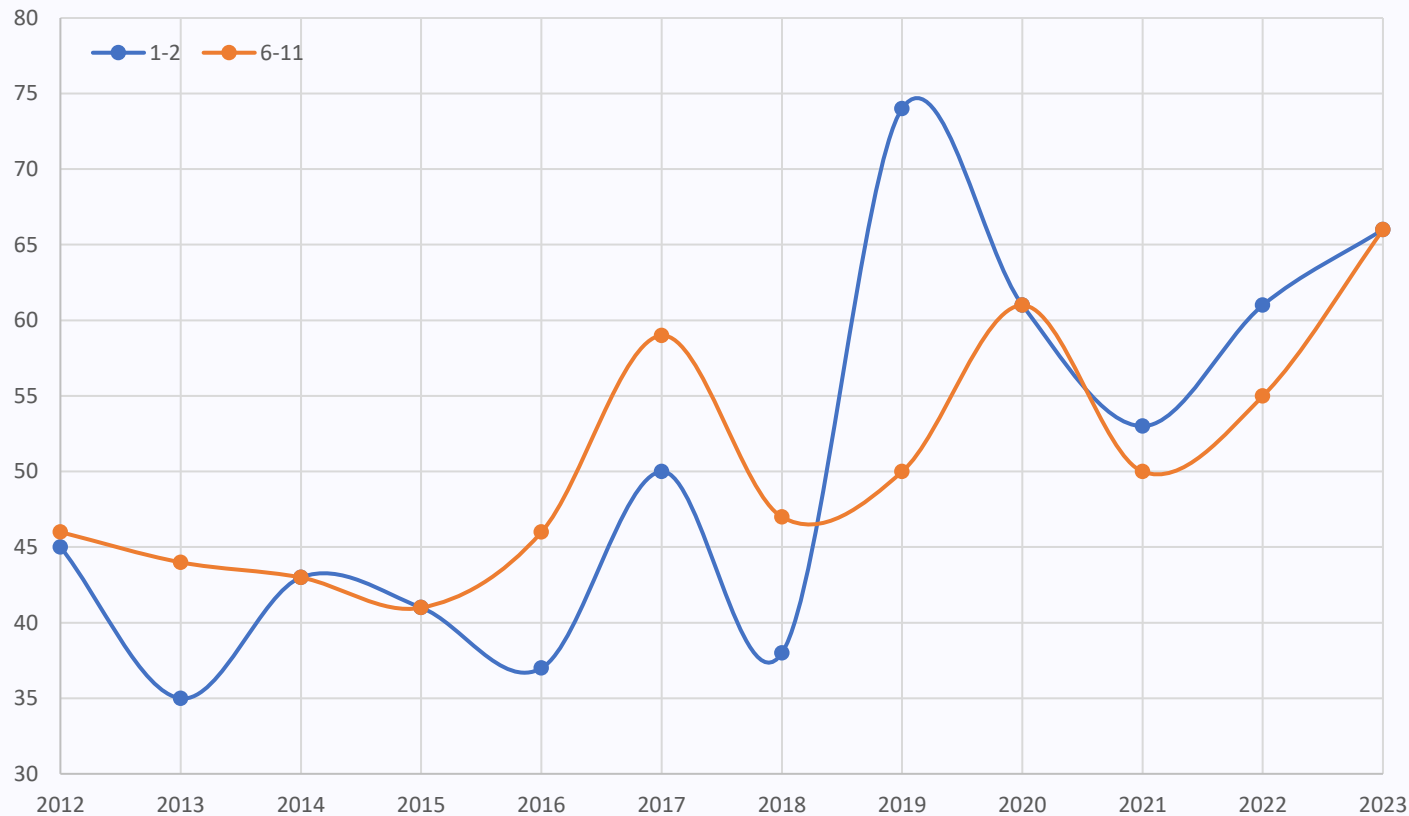


# Таблица зависимости запаздывания ИВА от года (днях)

|                         | 1-2 | 1-3 | 1-7 | 2-3 | 2-7 | 2-9 | 3-4 | 4-5 | 5-6 | 6-11 |
|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| 2012                    | 45  | 4   | 70  | 25  | 49  | 46  | 4   | 4   | 34  | 46   |
| 2013                    | 35  | 5   | 23  | 5   | 29  | 32  | 5   | 5   | 23  | 44   |
| 2014                    | 43  | 5   | 44  | 5   | 44  | 41  | 5   | 5   | 5   | 43   |
| 2015                    | 41  | 8   | 38  | 11  | 23  | 35  | 5   | 5   | 62  | 41   |
| 2016                    | 37  | 7   | 37  | 10  | 37  | 37  | 4   | 4   | 46  | 46   |
| 2017                    | 50  | 20  | 50  | 23  | 50  | 47  | 5   | 5   | 62  | 59   |
| 2018                    | 38  | 8   | 50  | 11  | 38  | 44  | 5   | 5   | 41  | 47   |
| 2019                    | 74  | 50  | 62  | 35  | 56  | 65  | 14  | 17  | 53  | 50   |
| 2020                    | 61  | 7   | 61  | 4   | 58  | 58  | 4   | 4   | 64  | 61   |
| 2021                    | 53  | 2   | 47  | 2   | 47  | 50  | 2   | 29  | 2   | 50   |
| 2022                    | 61  | 4   | 67  | 4   | 61  | 64  | 4   | 4   | 4   | 55   |
| 2023                    | 66  | 6   | 36  | 6   | 39  | 60  | 3   | 3   | 69  | 66   |
| Среднее значение (день) | 50  | 11  | 49  | 12  | 44  | 48  | 5   | 8   | 39  | 51   |

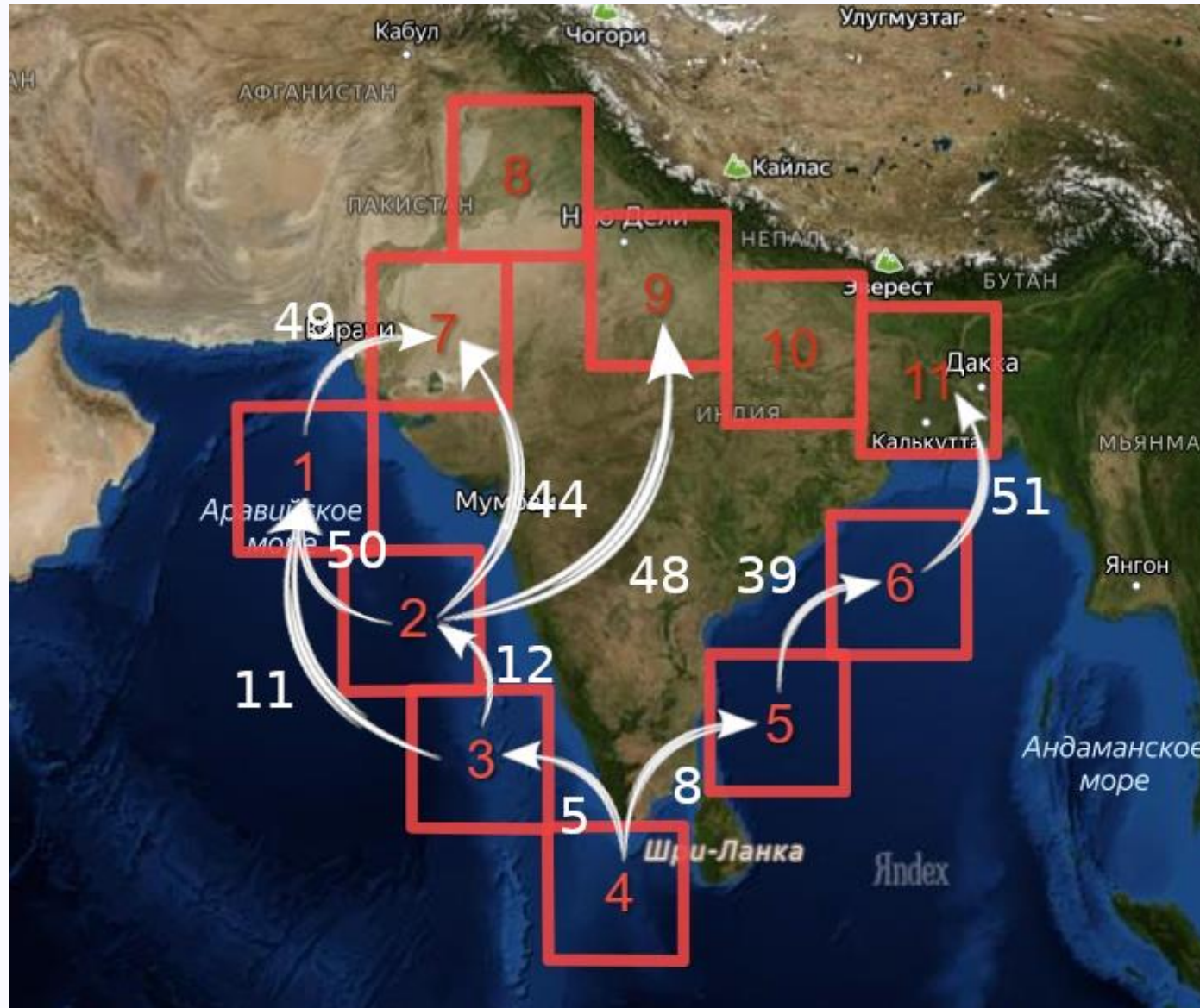
# Зависимость запаздывания от года для регионов 1-2 и 6-11

Зависимость запаздывания от года для регионов 1-2 и 6-11



Районы исследования

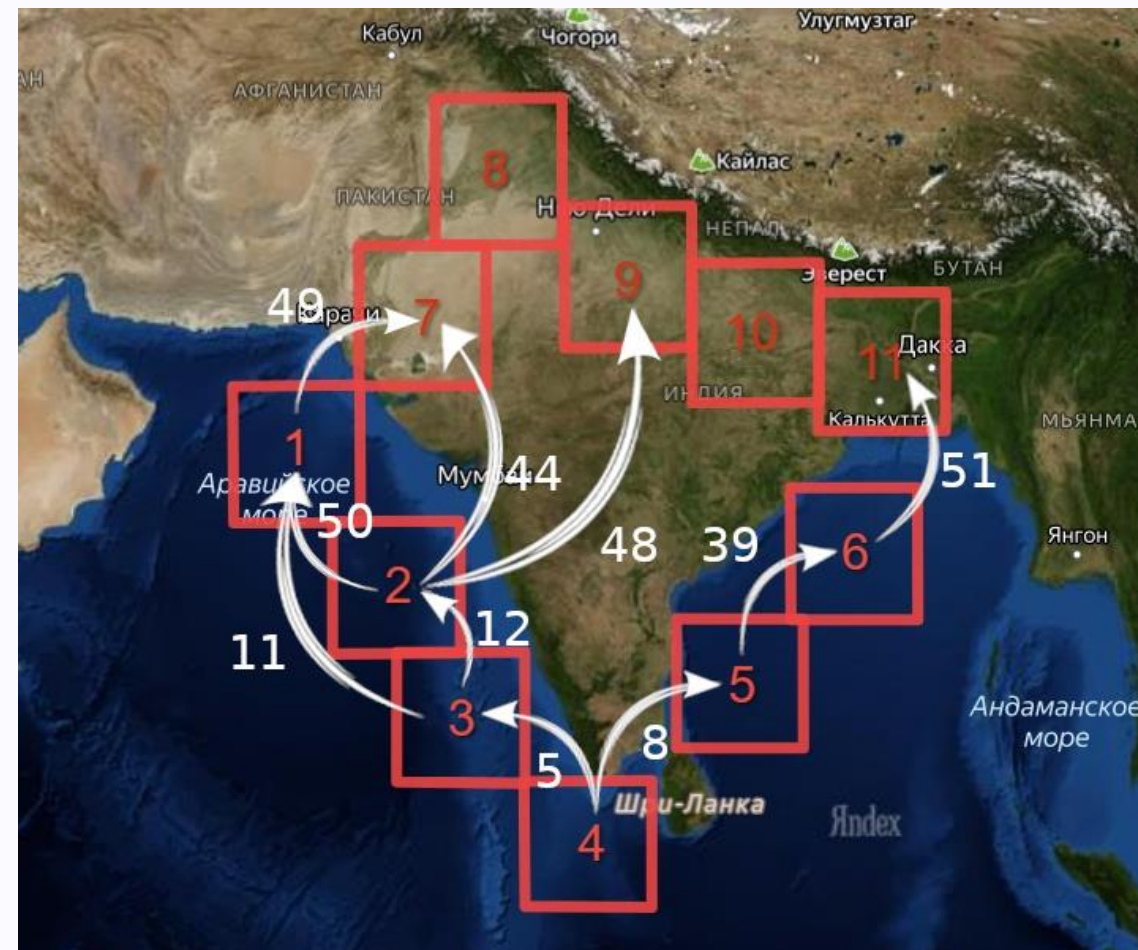
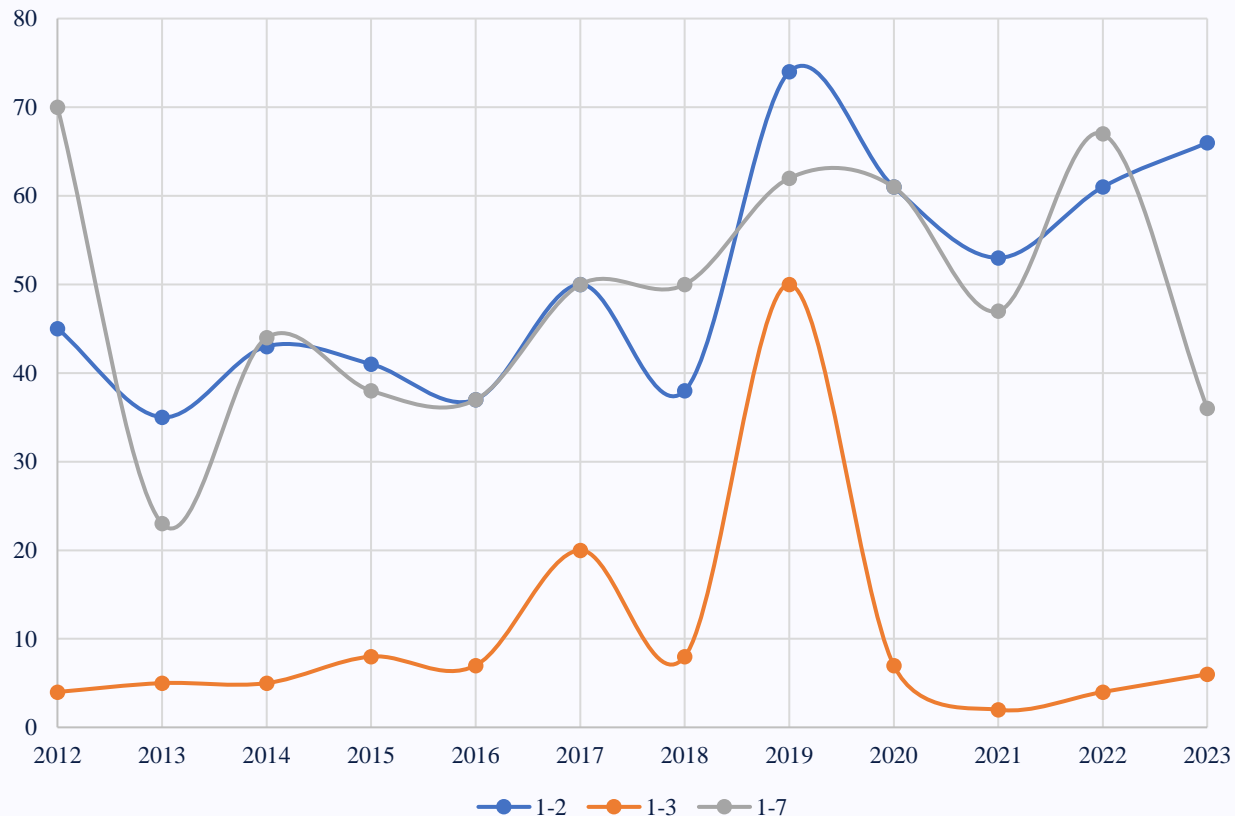
# Среднее запаздывание для 10 пар



Районы исследования

# Среднее запаздывание для регионов 1-2, 1-3, 1-7

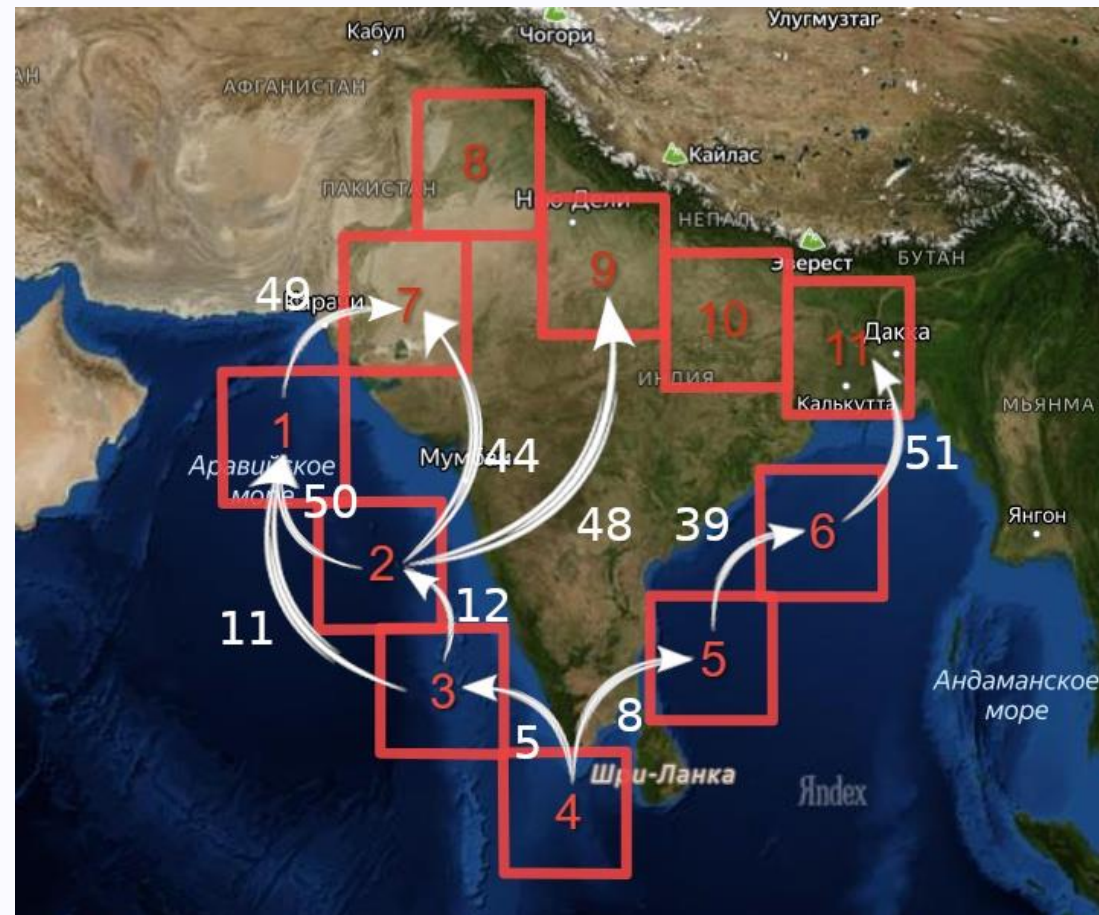
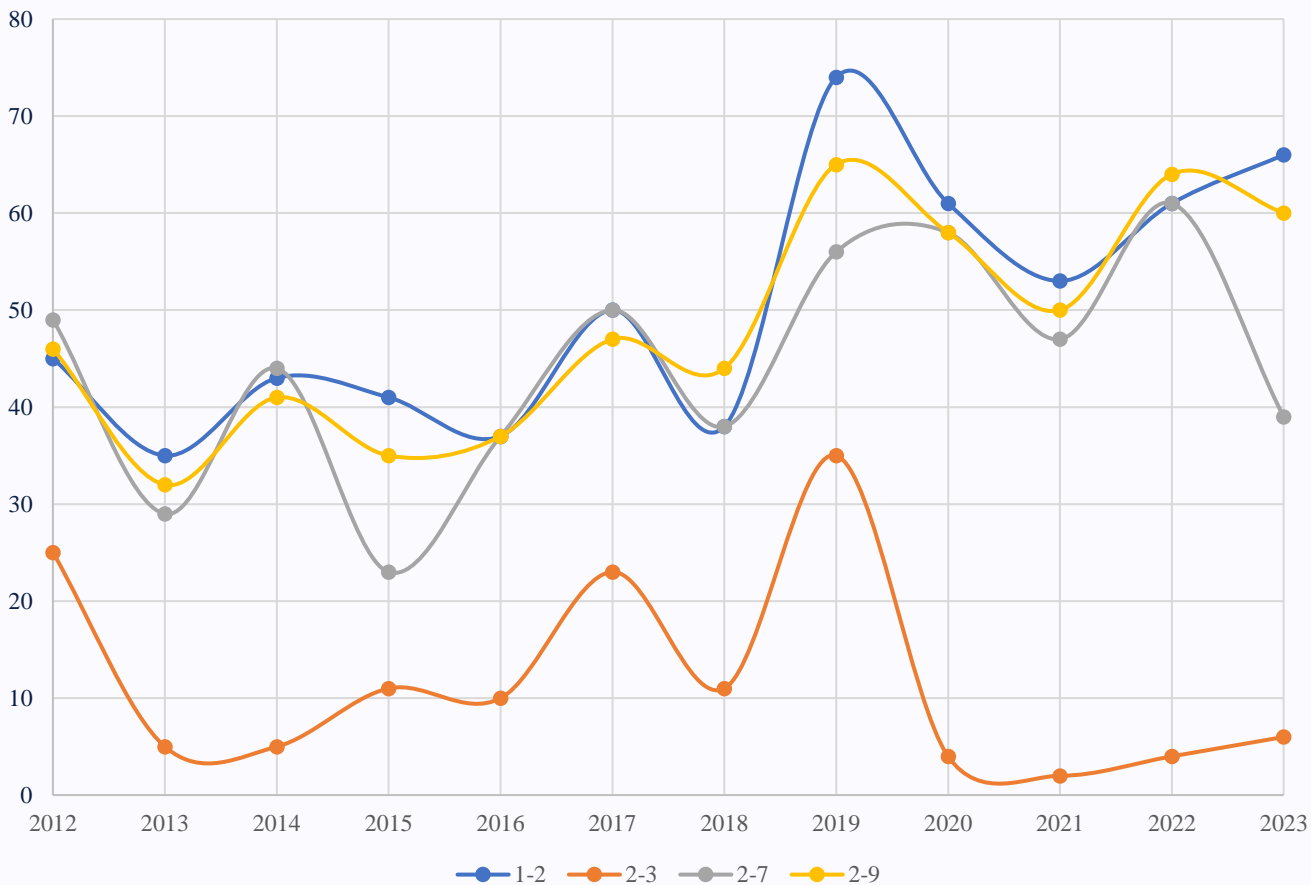
## Зависимость запаздывания от года для регионов 1-2, 1-3, 1-7



Районы исследования

# Среднее запаздывание для регионов 1-2, 2-3, 2-7, 2-9

Зависимость запаздывания от года для регионов  
1-2, 2-3, 2-7, 2-9



Районы исследования

# Заключение

- В результате работы была выявлена высокая корреляция не только среди соседних регионов, но и среди тех, которые не граничат между собой.
- Определено запаздывание ИВА для каждого года и среднее за период 2012-2023 гг. для 10 пар.
- С 2018 года запаздывание резко увеличилось для регионов 1-2, 1-3, 1-7, 2-3, 2-7, 2-9, что влияет на сельскохозяйственное планирование и требует адаптации стратегий в условиях изменения климата.
- Продемонстрирована перспективность предложенного подхода к изучению Индийского муссона и разработке алгоритмов прогнозирования его параметров по данным радиотепловых спутниковых наблюдений. Предстоит дальнейшая работа по завершению обобщающего анализа статистики по всем регионам и годам наблюдений.

**Спасибо за внимание!**