

Анализ поля интегрального влажносодержания атмосферы в районе южноазиатского муссона близ Индии по данным спутниковых микроволновых радиометров

*Кузьмин А.В.¹, Ермаков Д.М.^{1,2}, Суровяткина Е. Д.^{1,3},
Пашинов Е. В.¹, Втюрин С.А.¹*

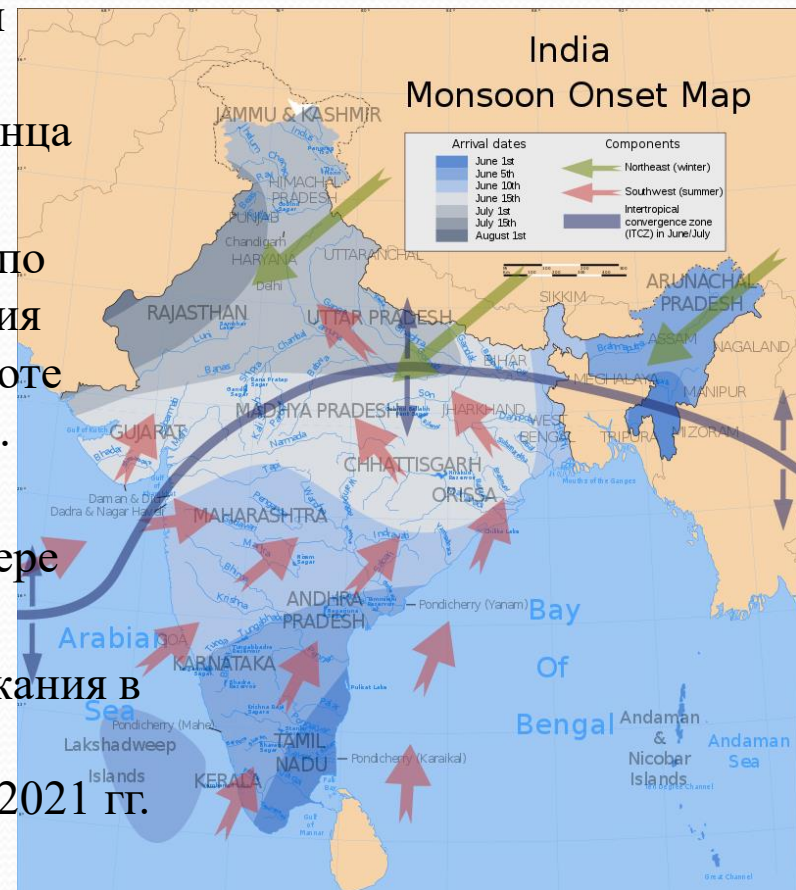
(1) Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

(2) Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Фрязинский филиал (ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН), Москва, Россия

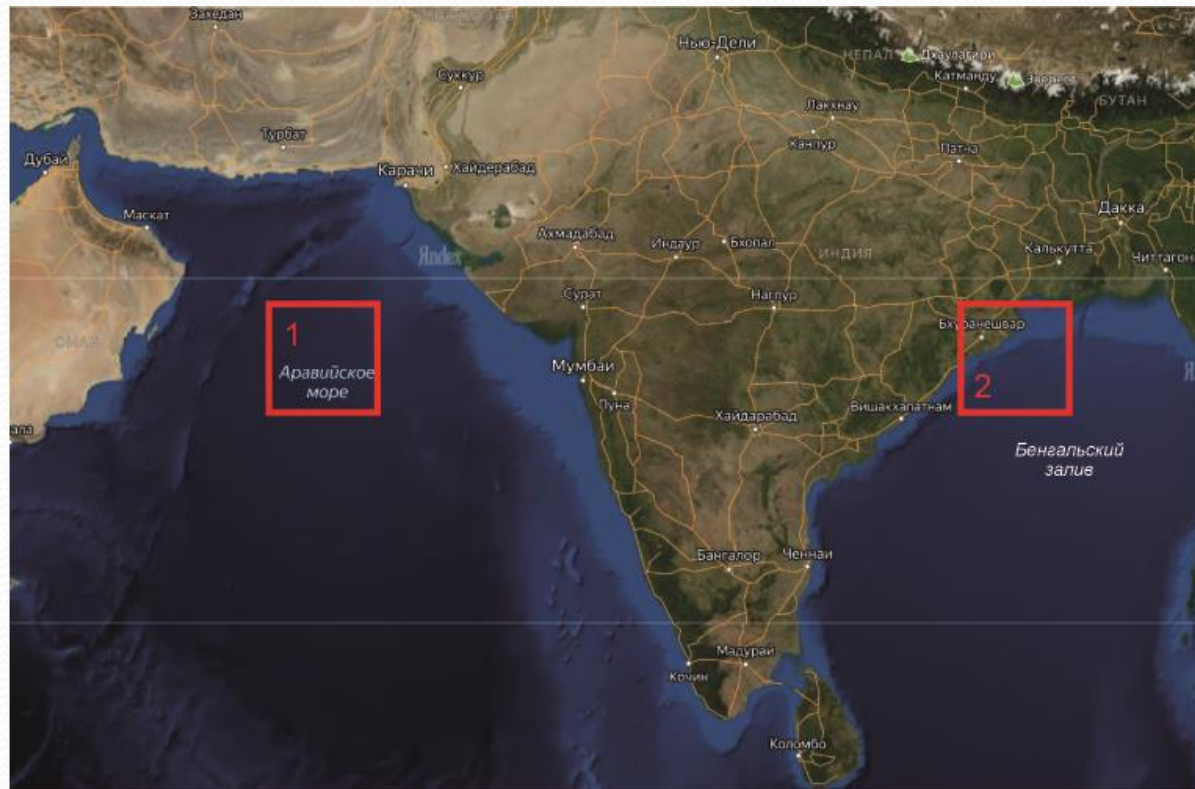
(3) Немецкий Центр Геонаук (GFZ Potsdam), Москва, Россия

Важность исследования южноазиатского муссона

- Явление, как климатический маятник, затрагивает большие районы тропической части Евразии и Индийского океана. Муссон существенно 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.
- Принципиальную роль играет пространственно-временное распределение водяного пара в атмосфере Земли.
- Рассмотрена динамика интегрального влагосодержания в двух районах близ Индийского полуострова: в Аравийском море и Бенгальском заливе с 2012 по 2021 гг. и проанализированы временные характеристики муссонного периода.



Район исследований



Район в Бенгальском заливе (2) представляет собой квадрат $3^{\circ} \times 3^{\circ}$ с центром в точке 20° с.ш. $87,5^{\circ}$ в.д., которая считается областью максимального содержания водяного пара в северной части Бенгальского залива. Вторая область выбрана такого же размера на той же широте в Аравийском море с центром в точке 20° с.ш. $64,5^{\circ}$ в.д.

Радиометрические данные

- Для восстановления PWV (precipitable water vapor) использовались данные спутников SSMIS за 2012...2021 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 ± 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 2021 гг.

Результаты тестирования восстановления PWV

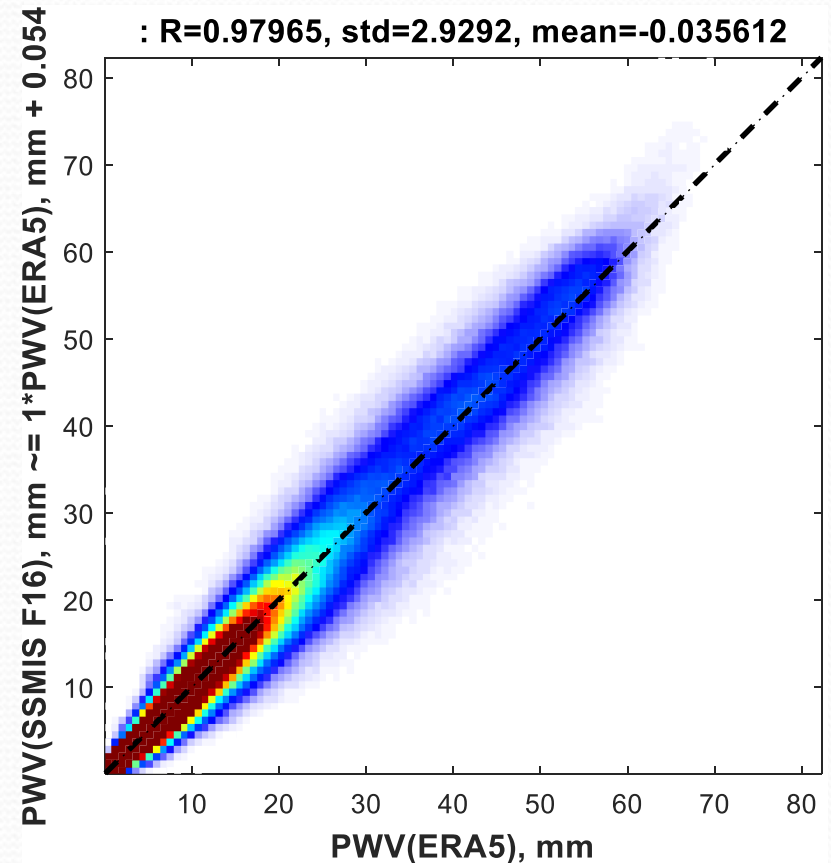
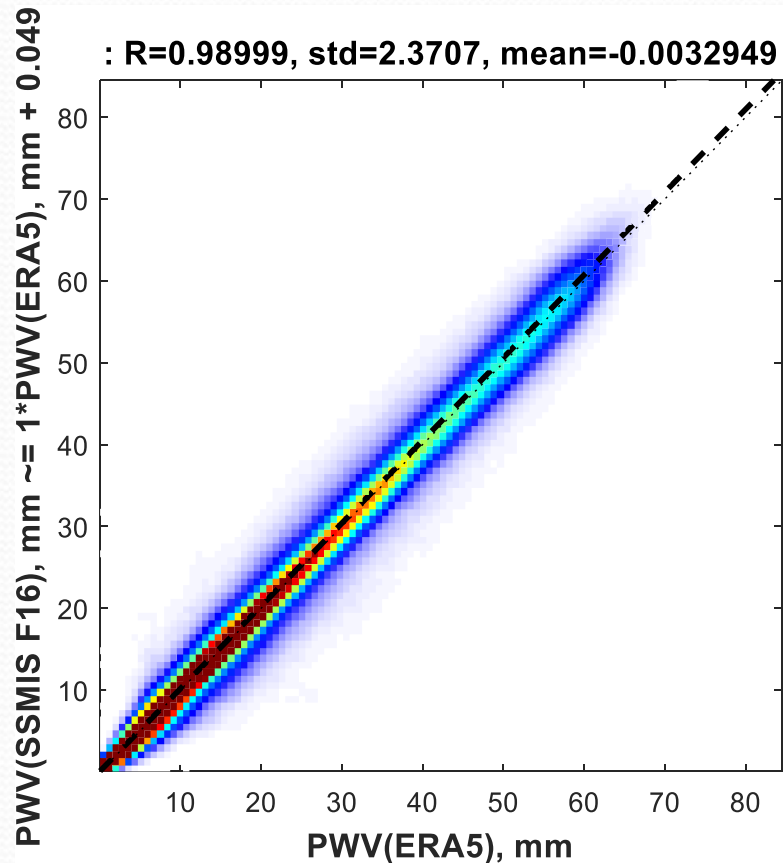
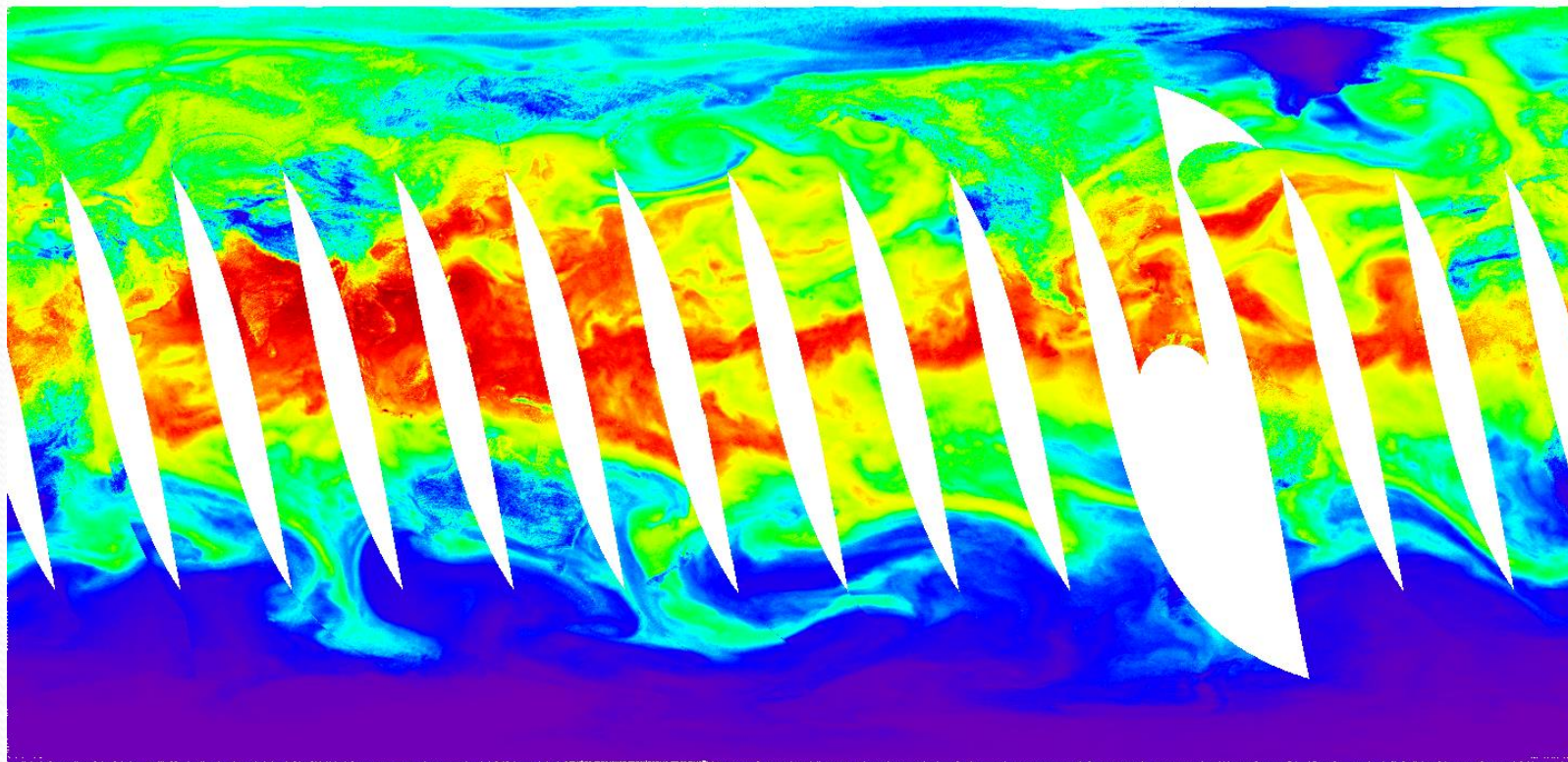


Диаграмма рассеяния PWV, восстановленного по данным SSMIS F16, и PWV по данным реанализа ECMWF Era 5 за 2020 год а) над всем Земным шаром, б) над сушей

Наличие лакун в спутниковых данных

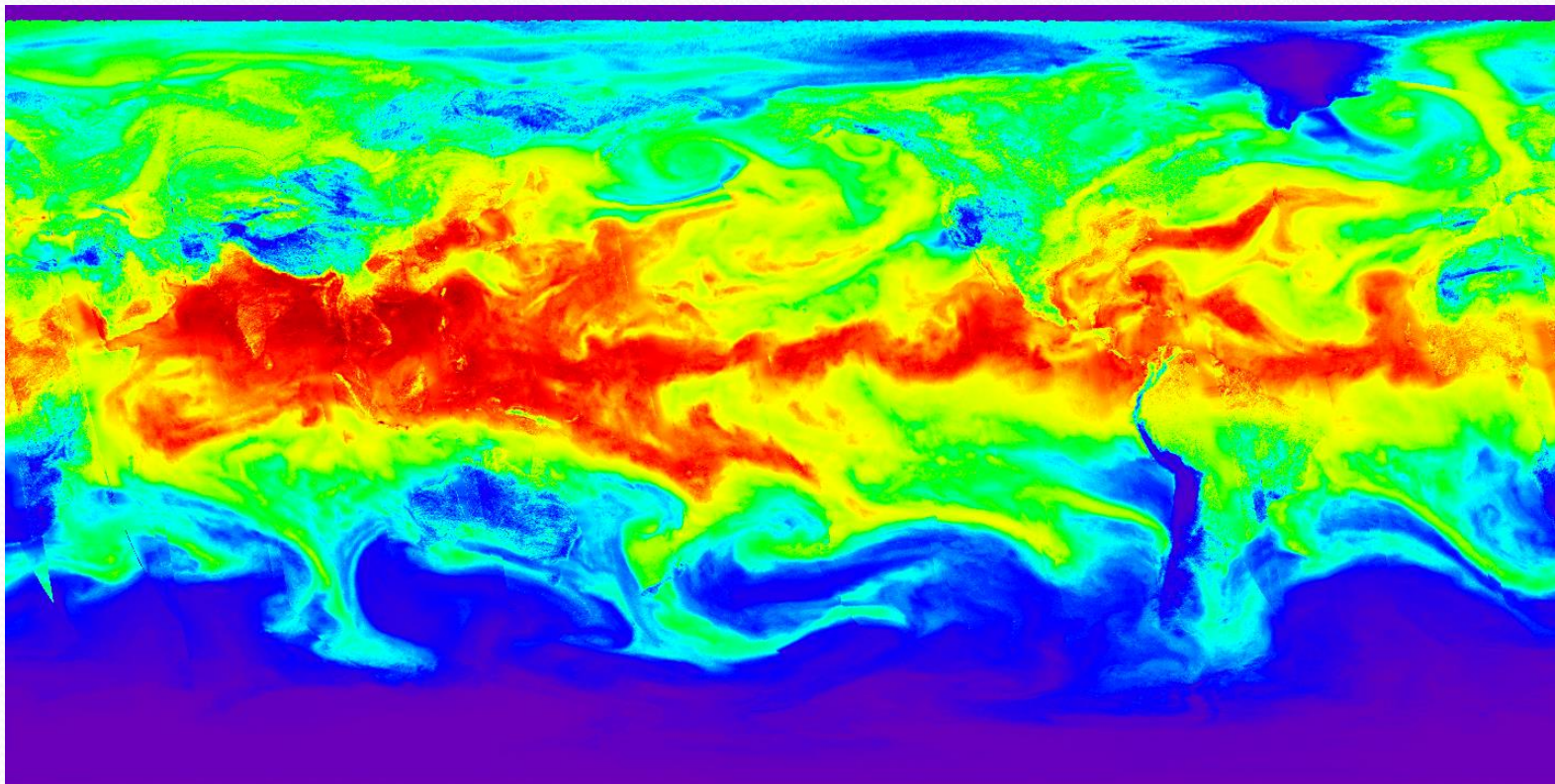


Методика радиотепловидения для устранения лакун

- Восстановление полей PWV по данным радиометрических измерений разных спутников;
- Нанесение полей PWV на регулярную прямоугольную сетку координат $0.25^\circ \times 0.25^\circ$;
- Устранение пропусков данных путём совмещения близких по времени полей PWV – получение опорных полей PWV;
- Временная интерполяция опорных полей;
- Вычисление векторов смещения между опорными или интерполированными полями и пересчёт их в векторы адвекции водяного пара.

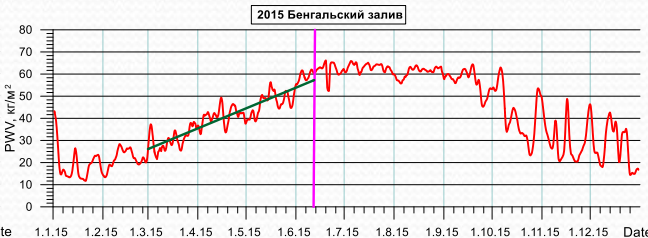
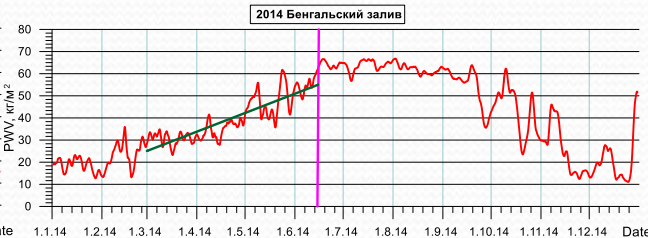
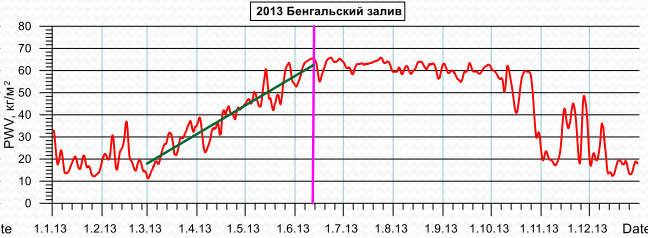
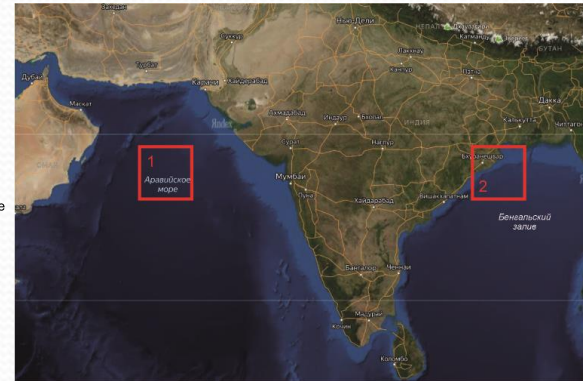
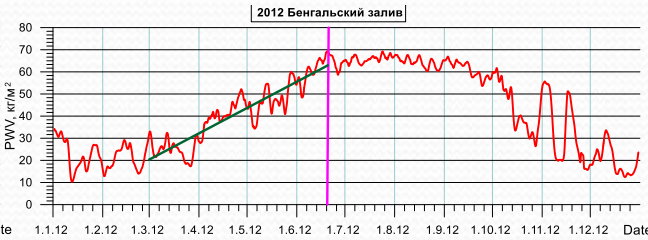
Для SSMIS оказывается возможным устранить лакуны практически полностью. За основные поля были взяты данные PWV со спутника F16, затем пропуски в них были закрыты данными F18 и F17. После этого остаются незначительные лакуны, которые устраняются интерполяцией данных на их краях.

Глобальное поле PWV без лакун

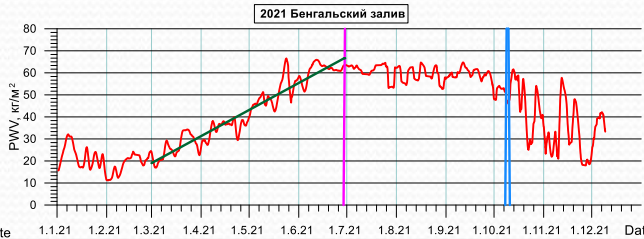
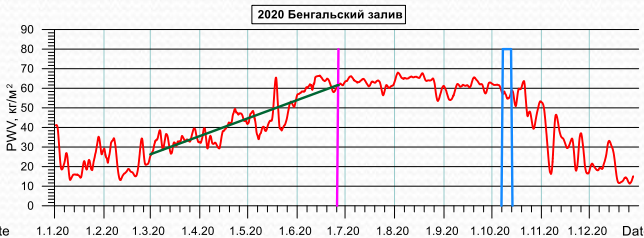
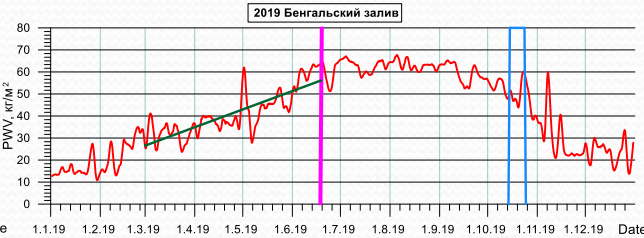
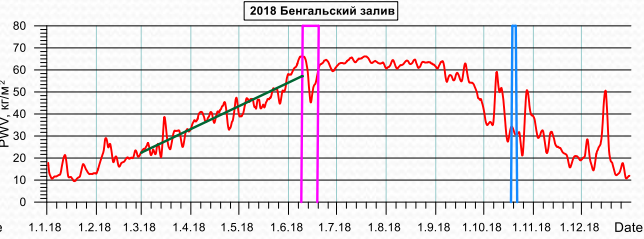
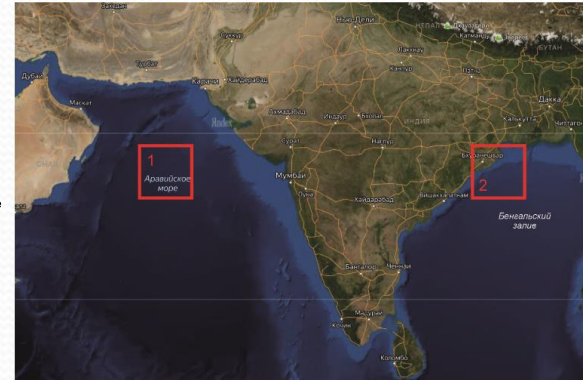


Глобальные поля PWV могут быть получены 2 раза в сутки с промежутком 12 часов. Они являются опорными для следующих ступеней алгоритма. Далее происходит вычисление оптического потока между опорными полями и вычисление смещения элементов изображения. При этом выполняется временная интерполяция опорных полей с периода 12 часов до 3-х часов. Получающиеся при этом поля векторов смещения элементов изображения можно пересчитать в векторы адвекции путём умножения вектора на величину PWV.

Интегральное влагосодержание за 2012-2016 в двух областях исследований



Интегральное влагосодержание за 2017-2021 в двух областях исследований



Анализ данных

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

Средние значения, дисперсии и стандартные отклонения PWV над районом 2 в Бискайском заливе

Период	15.06 - 09.20			15.06 - 10.10		
Год	Mean	Variance	Standard deviation	Mean	Variance	Standard deviation
2012	64,63	7,70	2,78	63,27	18,14	4,26
2013	61,47	8,00	2,83	61,02	9,80	3,13
2014	62,39	8,72	2,95	59,93	47,98	6,93
2015	61,48	12,45	3,53	59,81	34,23	5,85
2016	62,01	9,91	3,15	61,57	10,24	3,20
2017	62,65	6,37	2,52	62,14	7,71	2,78
2018	61,80	12,19	3,49	59,16	55,94	7,48
2019	61,87	15,31	3,91	61,03	17,84	4,22
2020	62,50	11,16	3,34	62,17	11,13	3,34
2021	61,00	18,13	4,26	59,71	27,25	5,22
Среднее:	62,18			60,98		

Заключение

- По микроволновым данным TDR Base (L1A) SSMIS F16-F18 с применением методики спутникового радиотепловидения были получены ежедневные поля водяного пара за период с 2012 по 2021 гг., как над поверхностью Мирового океана, так и над сушей.
- Использование метода спутникового радиотепловидения позволило получить полные суточные изображения PWV, убрав лакуны с пропусками данных. Из базы данных полей водяного пара для исследования характеристик южноазиатского муссона близ Индии были проанализированы данные PWV двух районов: в Аравийском море и Бенгальском заливе.
- Анализ данных показал, что полигон в Бискайском заливе с центром в точке 20° с.ш. $87,5^{\circ}$ в.д. является идеальным районом для исследования и диагностики процессов зарождения и окончания муссона в центральной Индии по данным полей интегрального водяного пара.
- В этом районе происходит относительно плавное возрастание PWV со средним трендом $0,33 \text{ кг/м}^2$ в сутки с начала марта и с началом муссона выходит на постоянную величину со средним значением за 2012–2021 гг. $62,18 \text{ кг/м}^2$. Снижение величины PWV от среднего значения характеризует окончание периода муссона.
- Анализ полей интегрального водяного пара PWV по микроволновым данным спутниковых радиометров может служить хорошим инструментом для исследования атмосферных процессов типа южноазиатского муссона как в глобальном, так и в региональном масштабах.

Спасибо за внимание!

