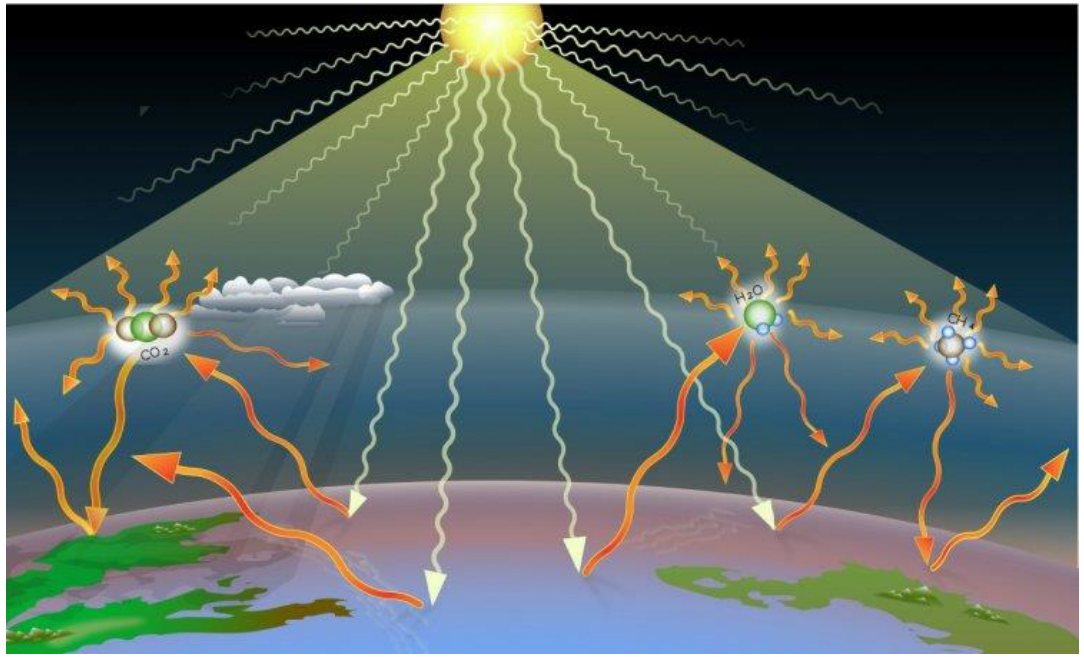
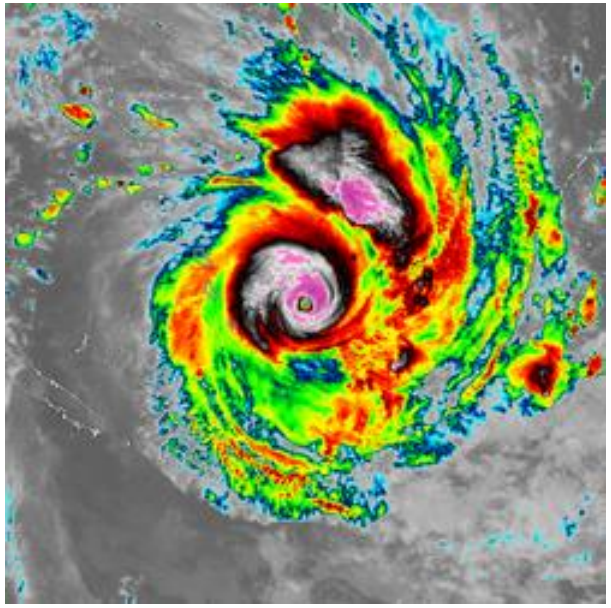
Спутниковое радиотепловидение в задаче исследования полярных циклонов

Пашинов Е.В., Втюрин С.А., Ермаков Д.М. (ИКИ РАН)

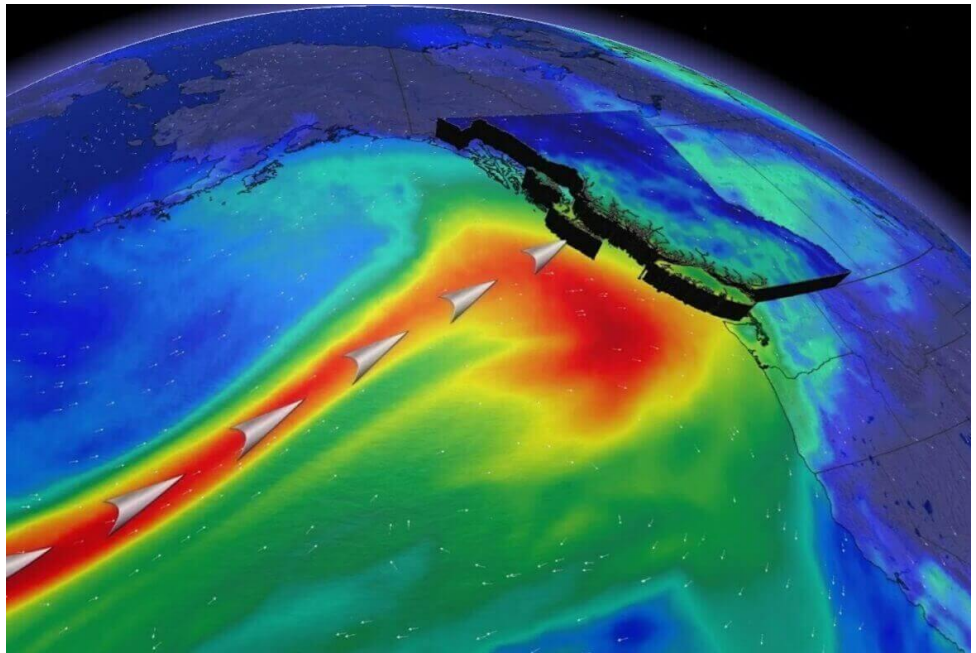
Двадцать четвертая международная конференция "СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА". Москва 9 – 13 ноября 2026 года

Водяной пар в атмосфере







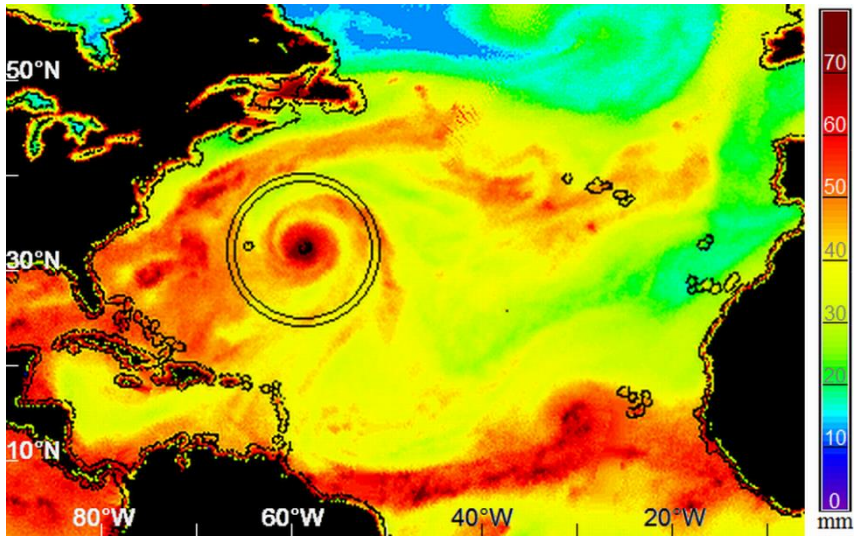


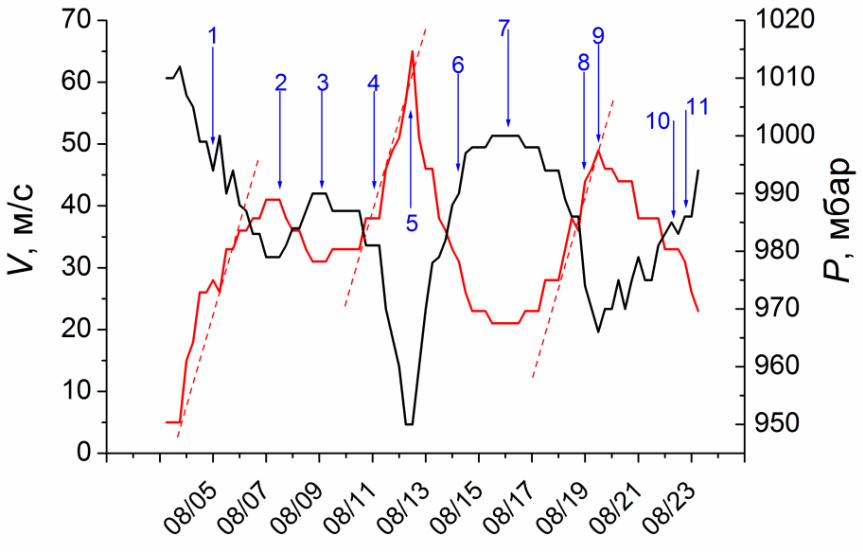


Спутниковое радиотепловидение

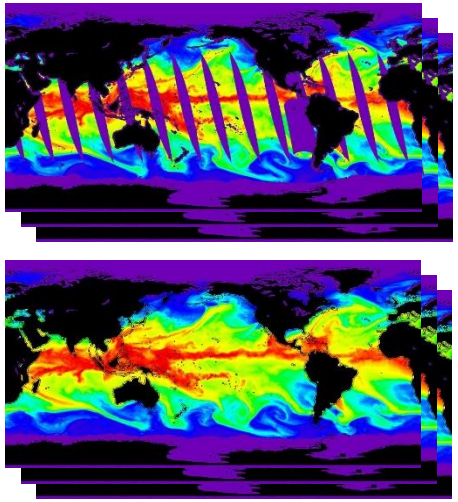
https://fireras.su/tpw/







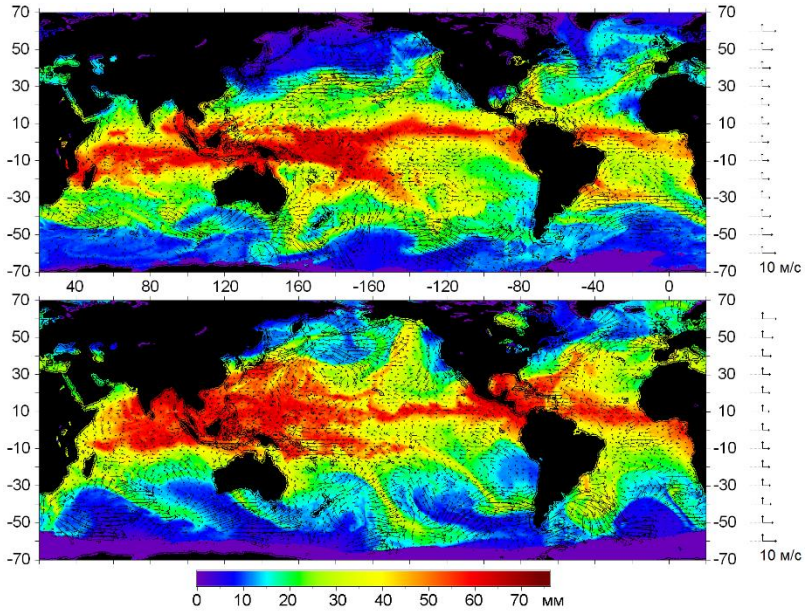
Спутниковое радиотепловидение



«мгновенные» ($\delta t = 0$) значения геофизических полей в точках наблюдений

↓ сшивка лакун

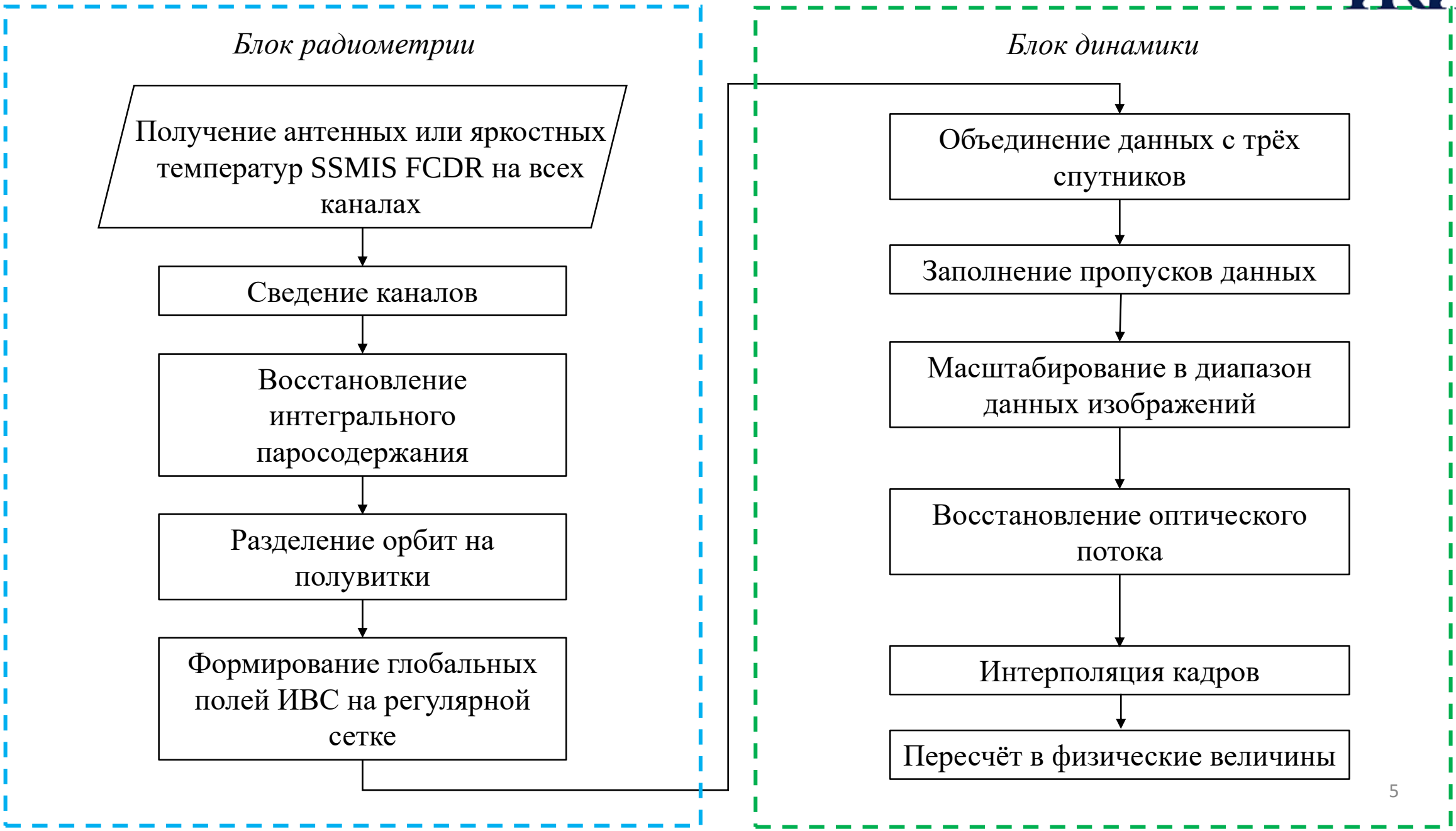
геофизические поля системы «океан-атмосфера» полного покрытия с периодом 12 часов («опорные»)



↓ оценка и компенсация движения

геофизические поля системы «океан-атмосфера» полного покрытия, интерполированные к любому моменту времени в промежутке между «опорными» полями ($0 < \delta t < 12$ часов) и синхронные с ними векторные поля скорости адвекции

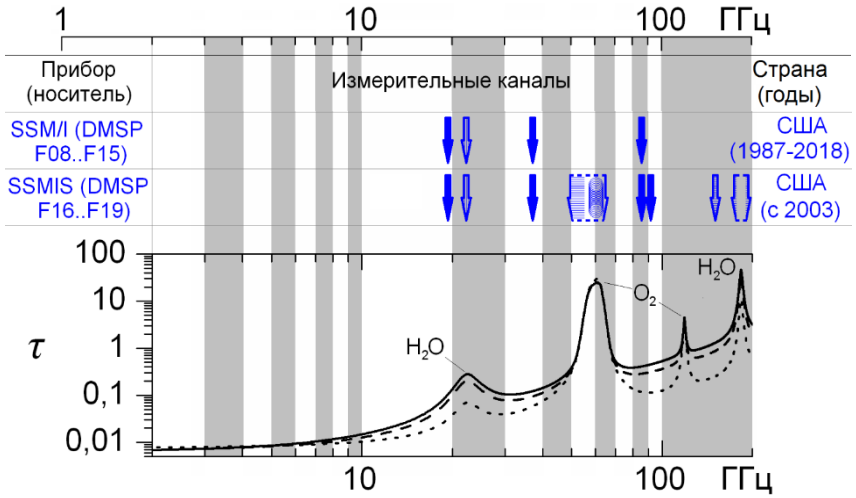
Схема обработки данных



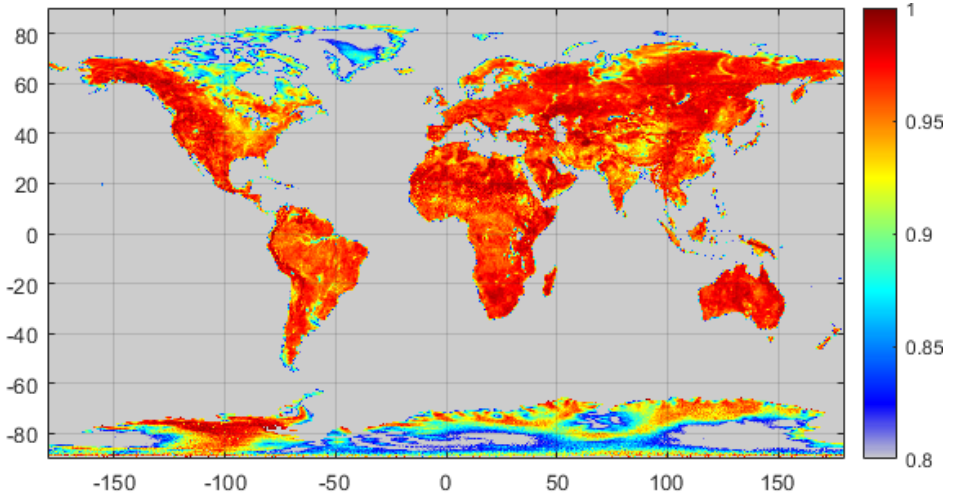
Данные многоканального радиотеплового спутникового мониторинга

Программа МО США – DMSP, приборы - Special Sensor Microwave…

- измерения ИВП над океаном с 1987 г. – SSM/I
- возможность измерений над всеми поверхностями - SSMIS 2004 – н.в.

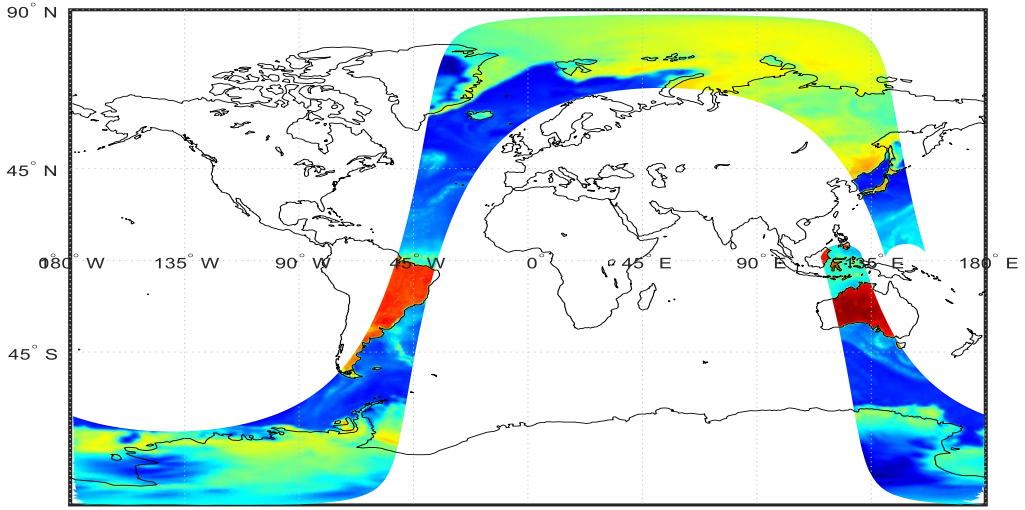


Излуч. способность SSM/I 22.235 ГГц (B)



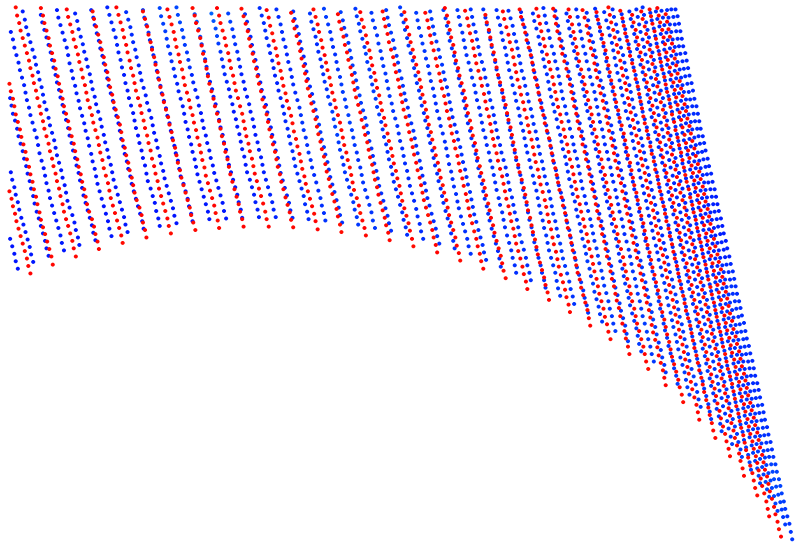
- восстановление интегрального паросодержания атмосферы над сушей (всеми типами поверхности) возможно по данным SSMIS.

Описание радиометрических данных



Ch. No.	Center Frequency (GHz)	Pass Band (MHz)	Polarization	NE?T (K)
1	50.3	400	H	0.4
2	52.8	400	H	0.4
3	53.596	400	H	0.4
4	54.4	400	H	0.4
5	55.5	400	H	0.4
6	57.29	350	*	0.5
7	59.4	250	*	0.6
8	150.0	1500	H	0.88
9	183.31±6.6	2500	H	1.2
10	183.31±3	100	H	1.0
11	183.31±1	500	H	1.25
12	19.35	400	H	0.7
13	19.35	400	V	0.7
14	22.235	400	V	0.7
15	37.0	1500	H	0.5
16	37.0	1500	V	0.5
17	91.655	3000	V	0.9
18	91.655	3000	H	0.9
19	63.283248 ±0.285271	3	V+H	2.4
20	60.792668 ±0.357892	3	V+H	2.4
21	60.792668 ±0.357892 ±0.002	6	V+H	1.8
22	60.792668 ±0.357892 ±0.0055	12	V+H	1.0
23	60.792668 ±0.357892 ±0.016	32	V+H	0.6
24	60.792668 ±0.357892 ±0.050	120	V+H	0.7

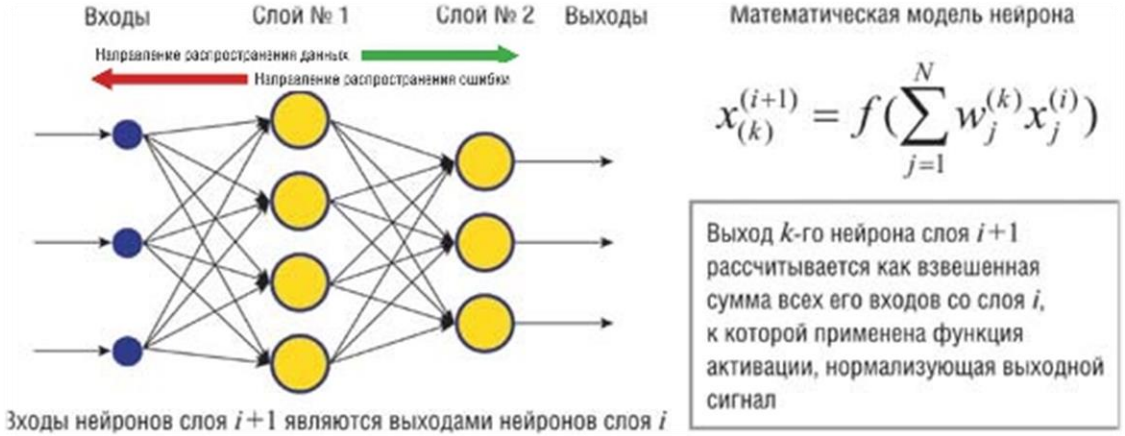
Полная доступность только в виде - BASE Temperature Data Record (TDR) dataset from Colorado State University (CSU).
Антенные температуры L1A до 2021. Частичная доступность в виде Fundamental Climate Data Record с 2021

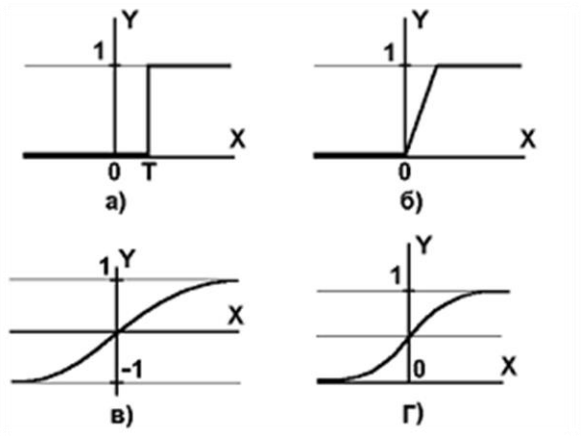


Восстановление интегрального паросодержания

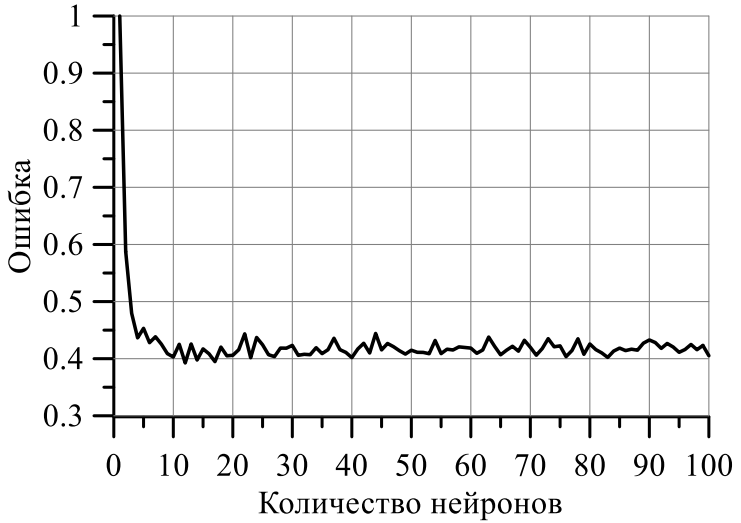
- Выборка совмещённых спутниковых и подспутниковых измерений за 2020 год.
- Подспутниковые измерения – реанализ ECMWF Era5. Совмещение по времени в пределах ±15 мин. Всего – 8 млн случайных измерений за год для каждого спутника.
- Случайное разбиение на обучающую и тестовую выборки. Обучающая – 5 млн измерений, тестовая – 3 млн измерений.
- Нейросеть – прямого распространения с одним скрытым слоем.

  Формула:

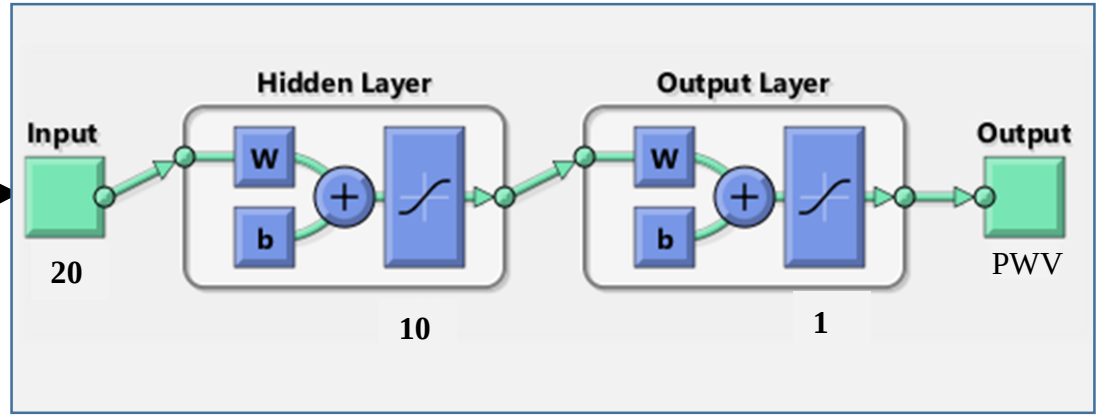




Восстановление интегрального паросодержания



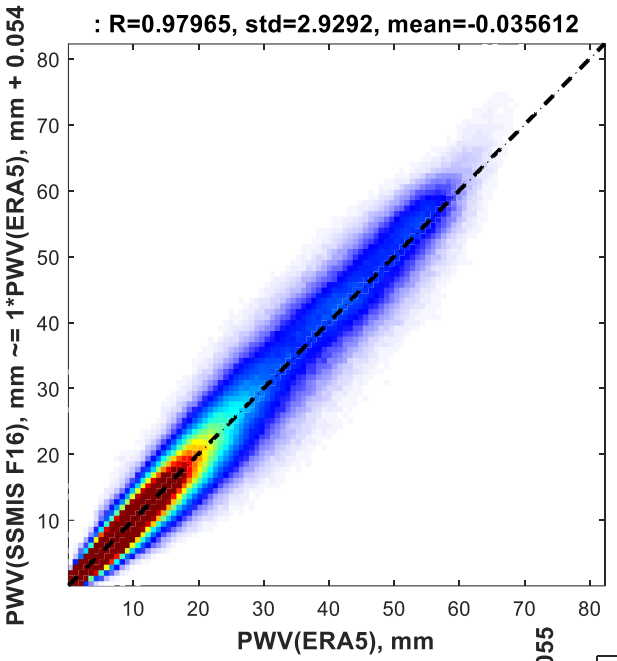
Ch. No.	Center Frequency (GHz)	Pass Band (MHz)	Polarization	NE?T (K)
1	50.3	400	H	0.4
2	52.8	400	H	0.4
3	53.596	400	H	0.4
4	54.4	400	H	0.4
5	55.5	400	H	0.4
6	57.29	350	*	0.5
7	59.4	250	*	0.6
8	150.0	1500	H	0.88
9	183.31±6.6	2500	H	1.2
10	183.31±3	100	H	1.0
11	183.31±1	500	H	1.25
12	19.35	400	H	0.7
13	19.35	400	V	0.7
14	22.235	400	V	0.7
15	37.0	1500	H	0.5
16	37.0	1500	V	0.5
17	91.655	3000	V	0.9
18	91.655	3000	H	0.9

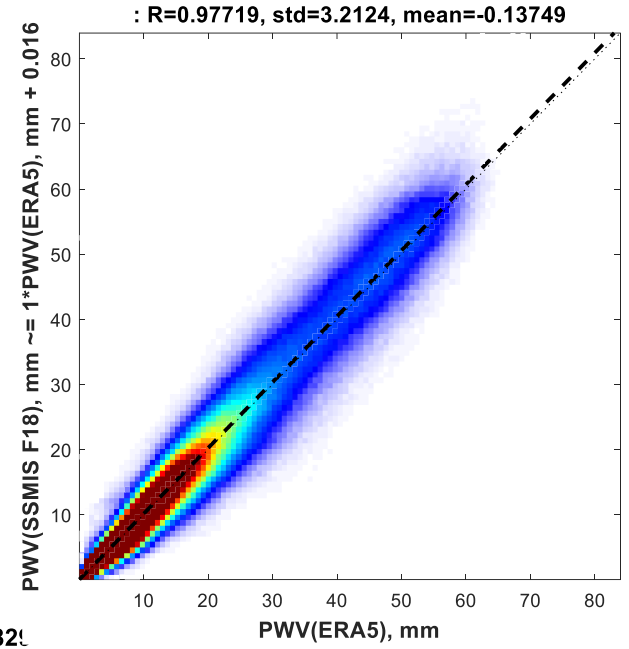


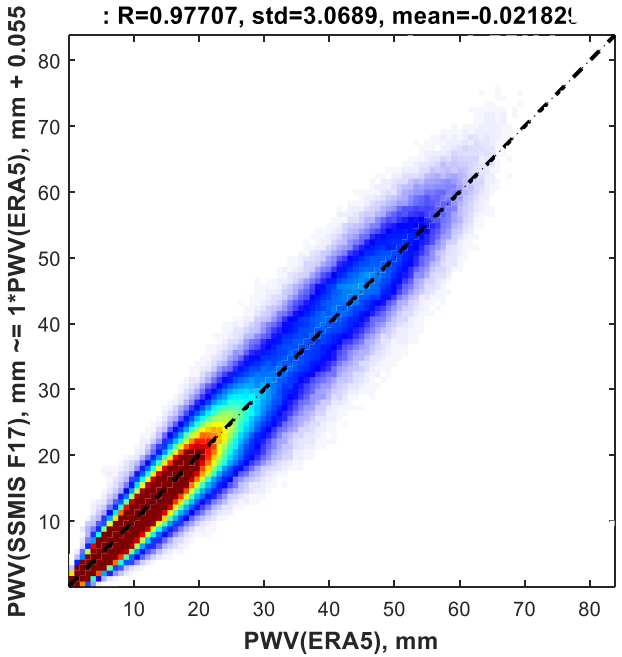
+

- Высота поверхности
- Флаг типа поверхности

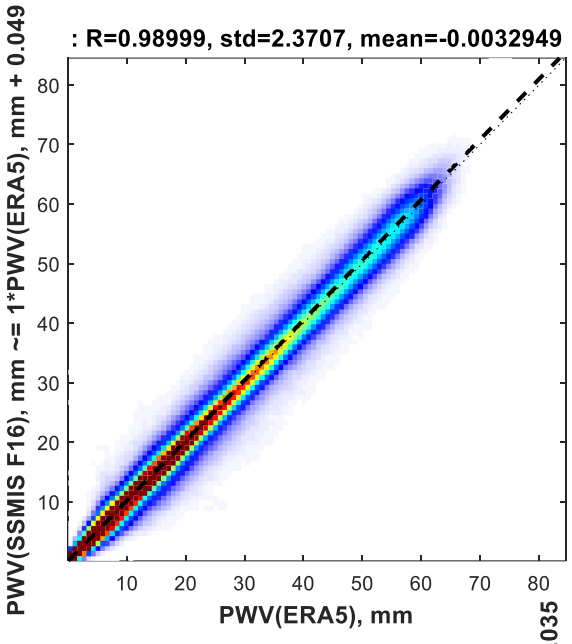
Восстановление интегрального паросодержания над сушей

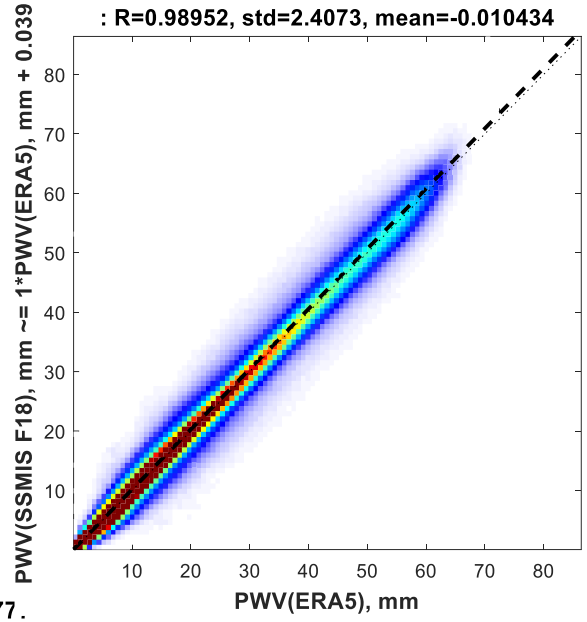


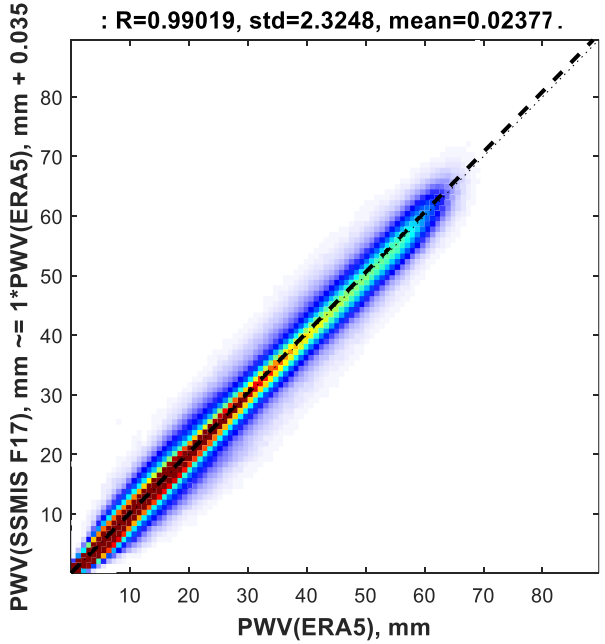




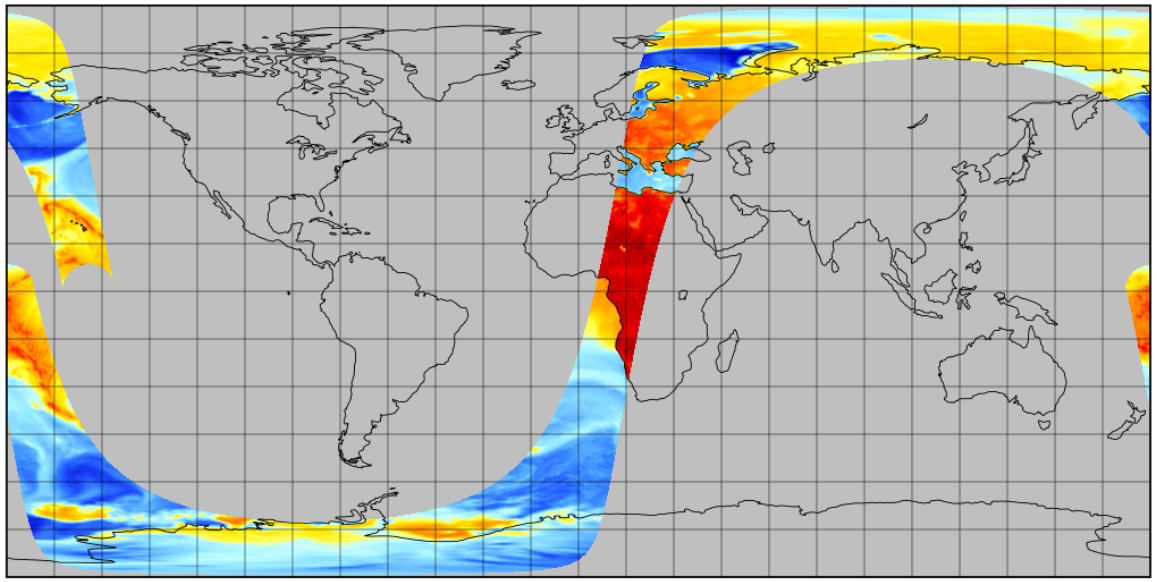
Восстановление интегрального паросодержания по всему земному шару

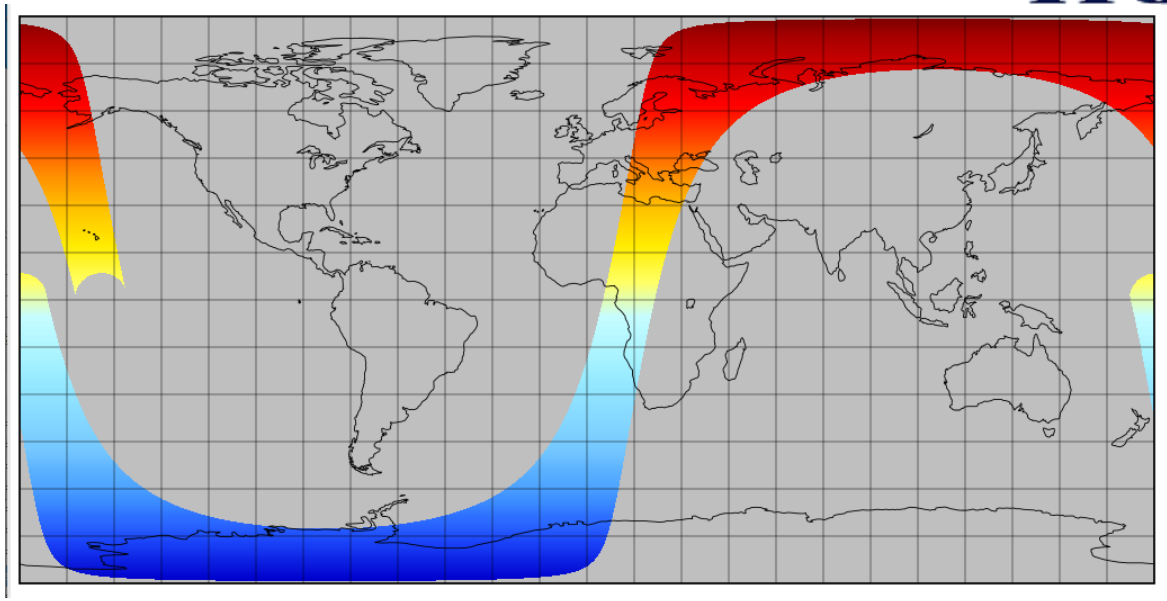


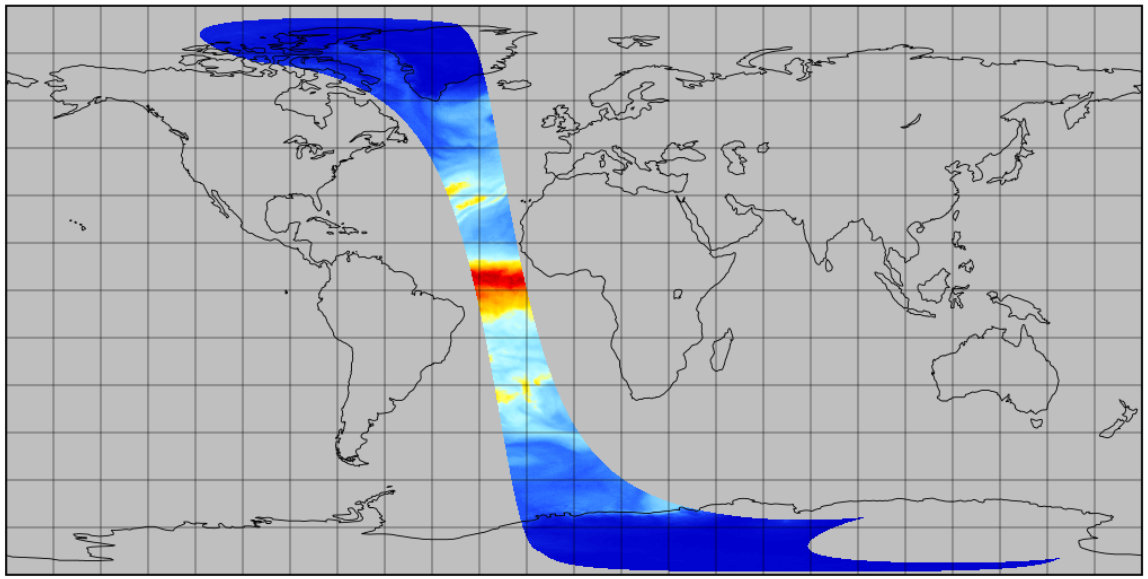


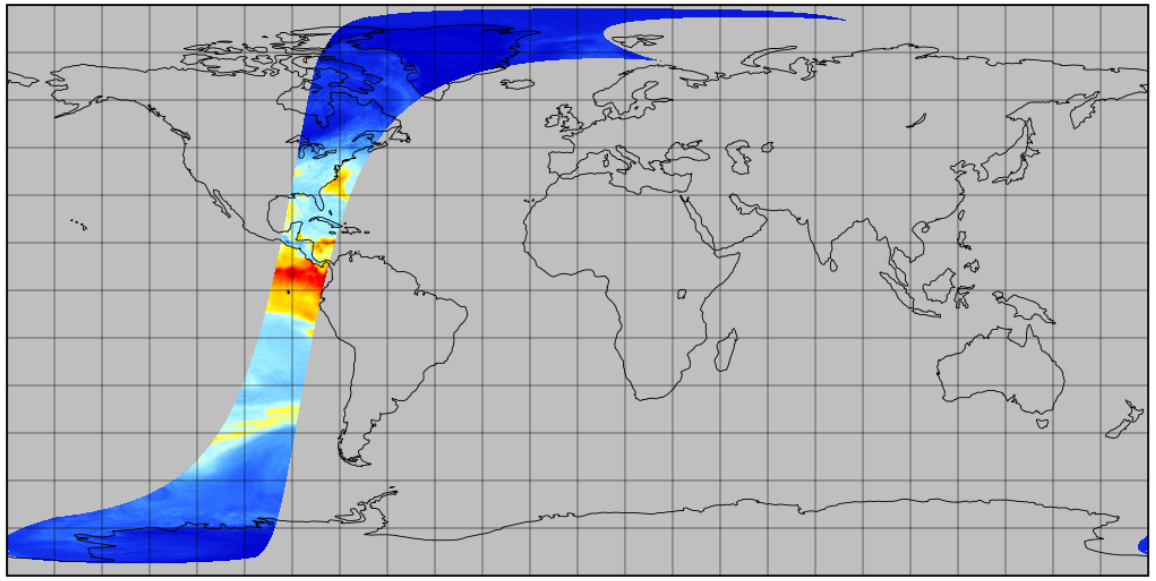


Разделение орбит на полувитки









Масштабирование в диапазон изображений

- Используемая реализация оптического потока требует входных данных в формате однобайтовое целое.

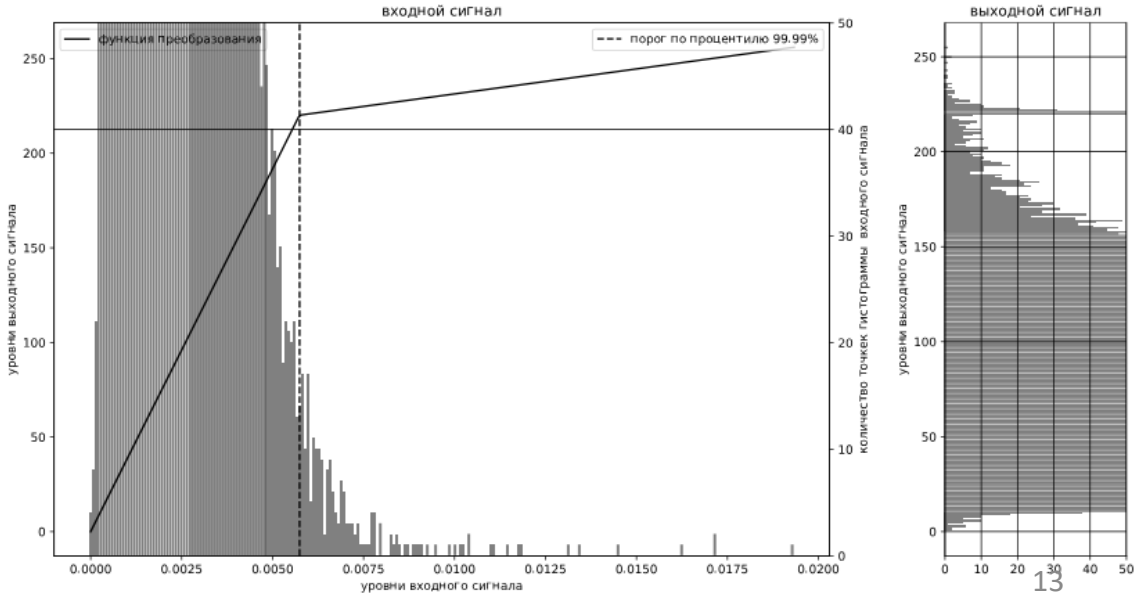
- В новых версиях для учёта редких экстремальных, но значимых величин при преобразовании данных в нужную точность применяется кусочно-линейная компрессия по порогу, определяемому заданным процентилем.

- И масштабирование и компрессия применяется к паре обрабатываемых кадров с общими параметрами, что улучшает оценку смещений.

$$k_1 = \frac{T}{p_1}, \quad k_2 = \frac{1 - T}{s_{\max} - p_1}$$

$$S_{compressed} = int8\left(255 \cdot \begin{cases} k_1 \cdot s, & s \le p_1 \\ T + k_2 \cdot (s - p_1), & s > p_1 \end{cases}\right)$$

где: S — исходный сигнал, $p_1 = Q_\alpha(S)$- α-й процентиль сигнала, где α — выбранный уровень процентиля. $s_{max}(S)$ — максимальное значение сигнала, T — пороговое значение (outThreshold).

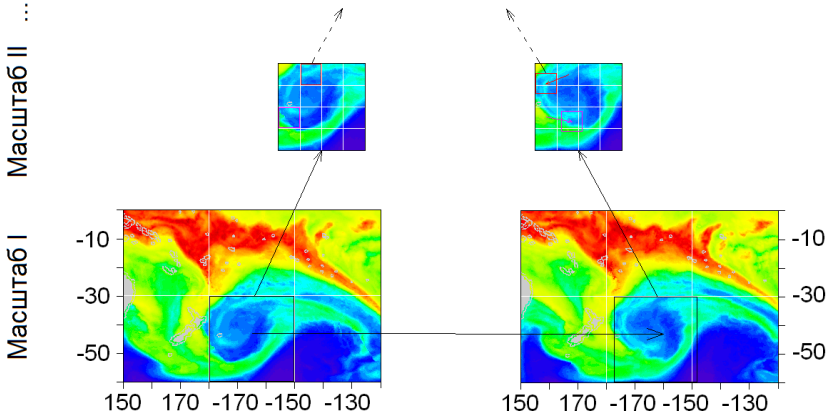


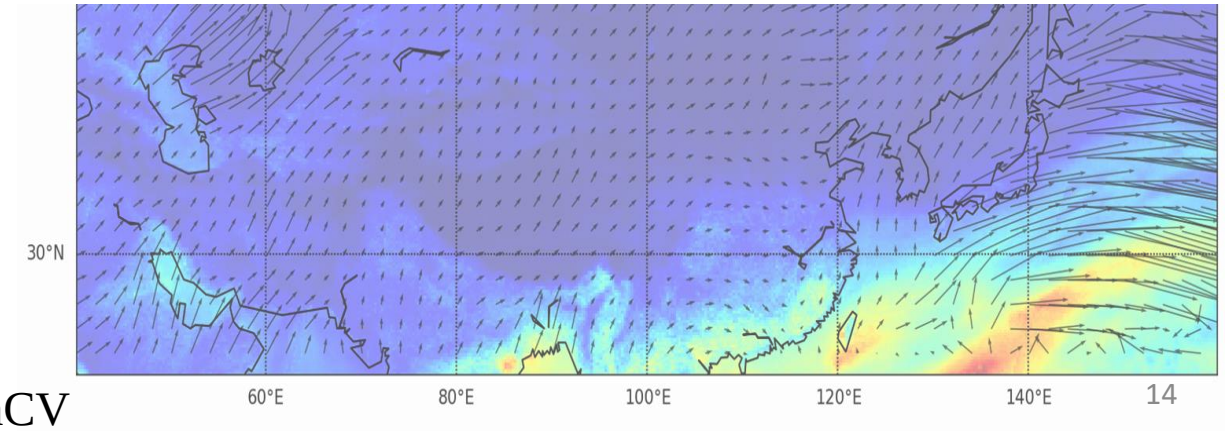
Оценка оптического потока

Используется алгоритм DIS (*англ.* DenseInverseSearch), предложенный в работе (Kroegeret al., 2016).

Преимущества для данной задачи:

- Вычисляет плотный оптический поток (в каждой точке исходного изображения)
- На каждой итерации рассчитывается промежуточное плотное поле перемещений
  - повышает сглаженность
  - улучшает производительность
- Вариационная корректировка с критерием гладкости улучшает фильтрацию «выбросов»
- возможность анализа большого диапазона масштабов смещений
  - субпиксельная интерполяция для малых масштабов
  - анализ пирамиды изображений для больших масштабов



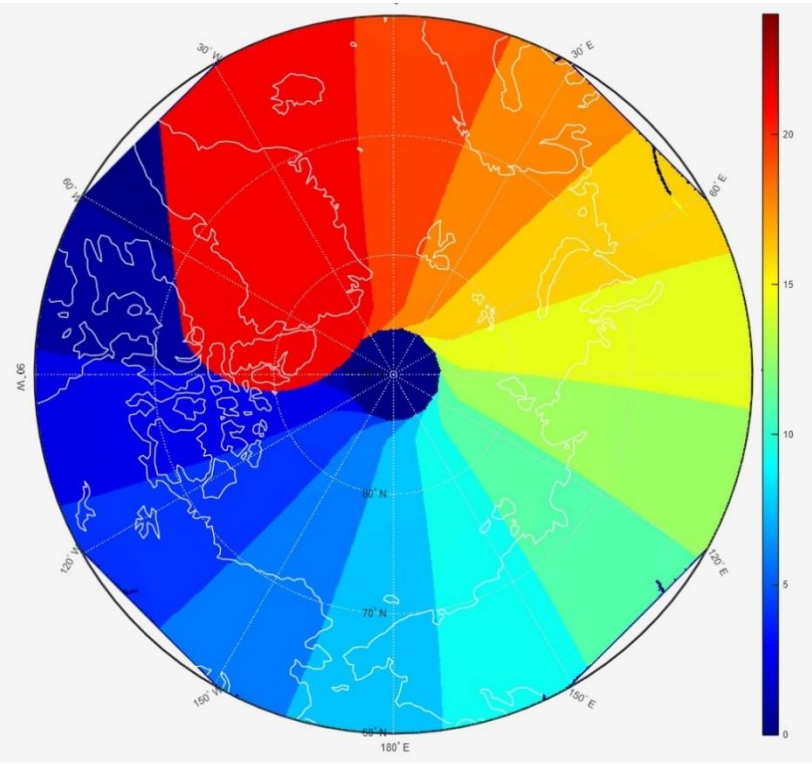


Используется реализация из открытой библиотеки openCV

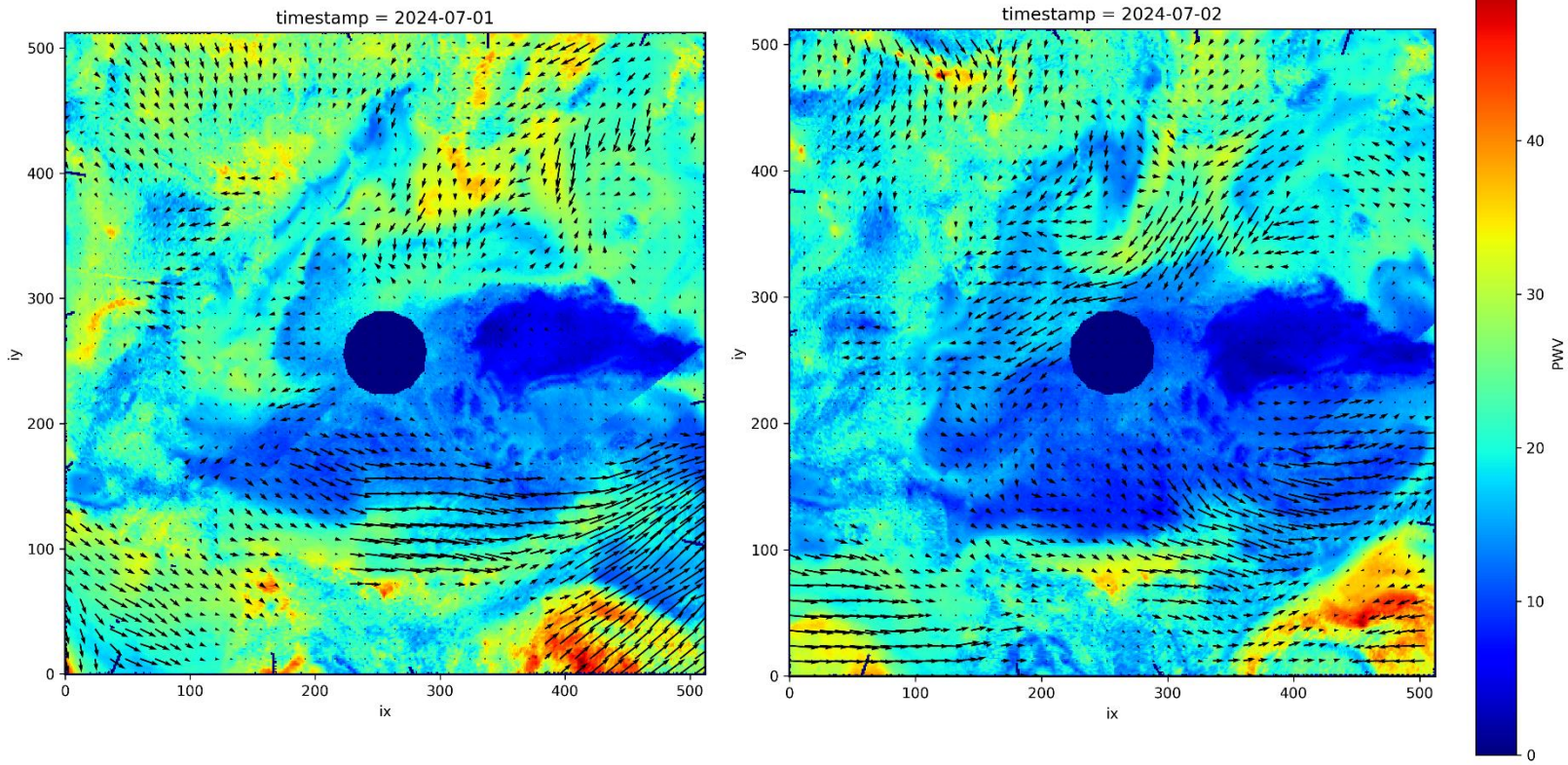
Построение полей водяного пара в полярной проекции и оценка его движения

Используются полувитки с одного спутника DMSP F18

Время измерений с начального момента за одни сутки



Восстановленный оптический поток между двумя соседними во времени изображениями



Пересчёт в физические величины

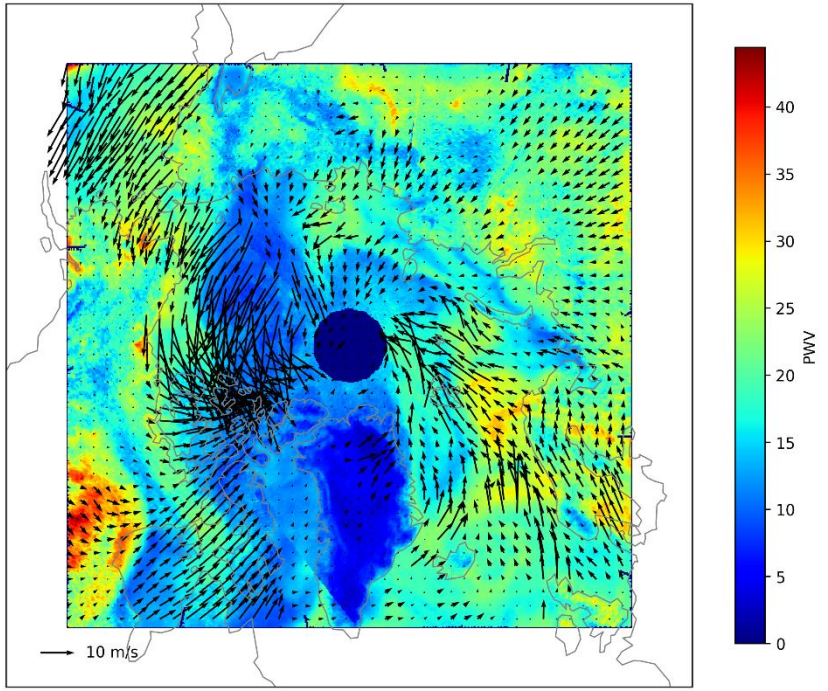
- Сырой результат оценки оптического потока — векторы смещений пикселов в проекции заданного изображения. При этом плоское изображение представляет собой цилиндрическую проекцию, следовательно, для перехода к реальным линейным размерам требуется преобразование

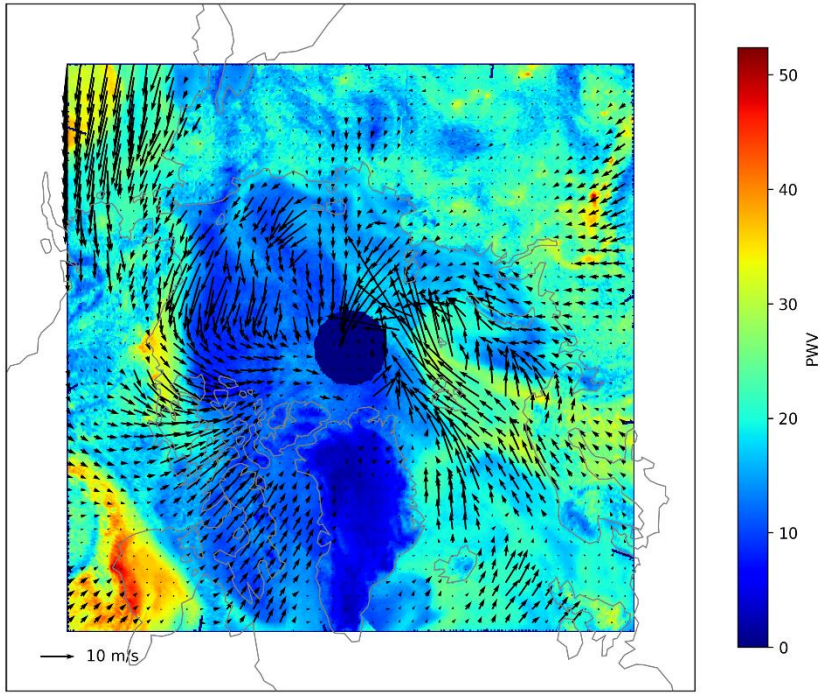
- Пикселы преобразуются в **градусы**, соответственно принятой сетке

- По формулам гаверсинуса, оптимизированной для цикла по матрице, вычисляются соответствующие дистанции в **метрах**.

$$d = 2r \arcsin\left(\sqrt{\sin^2\left(\frac{\phi 2 - \phi 1}{2}\right) + \cos(\phi 1)\cos(\phi 2)\sin^2\left(\frac{\lambda 2 - \lambda 1}{2}\right)}\right)$$

- Для получения скорости в **м/с** используется промежуток времени, между условными временами кадра.





Заключение

- В докладе продемонстрированы основные элементы технологической цепочки подхода спутникового радиотепловидения, который позволяет оценить адвекцию водяного пара в атмосфере по даным спутниковых радиотепловых измерений.

- Оригинальный подход разрабатывался для анализа полей водяного пара на равномерной прямоугольной сетке в основном для данных SSMIS.

- Показана применимость данного подхода для исследования динамики водяного пара в полярных и приполярных областях где возможно развитие полярных циклонов.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 26-17-00386 «Система детектирования и определения характеристик полярных циклонов на основе средств дистанционного зондирования Земли и искусственного интеллекта».

Спасибо за внимание!