



# Развитие программных средств расчёта динамики водяного пара и парниковых газов в атмосфере и расчёт их баланса над регионами произвольной формы.

Втюрин С.А. <sup>1</sup>

Ермаков Д.М. <sup>1,2</sup>

Пашинов Е.В. <sup>1</sup>

(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), Фрязино, Московская обл., Россия

# Постановка задачи и предыстория

Расчёт баланса парниковых газов по данным спутникового радиотепловидения

Расчёт баланса из горизонтальной динамики:

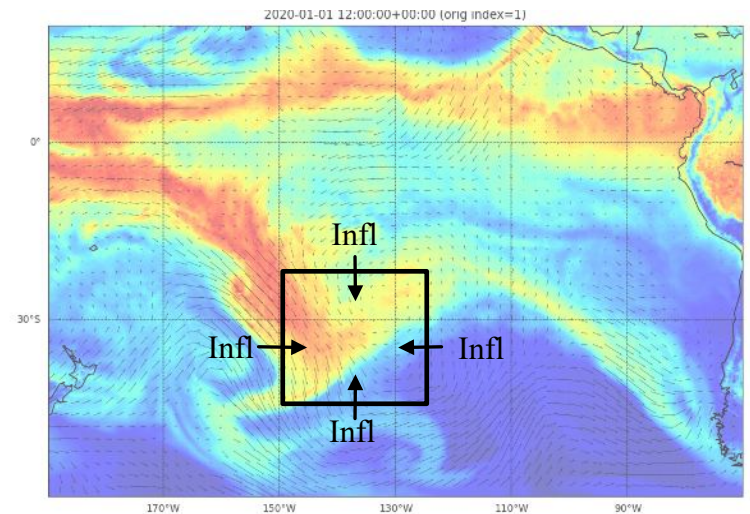
$$\int_{t_{\min}}^{t_{\max}} B(t) dt = - \int_A \int M(x, y) dx dy \Big|_{t_{\min}}^{t_{\max}} - \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} dt \oint F(x, y) dn,$$

где  $t_{\min}$  и  $t_{\max}$  — начало и конец интервала наблюдений, соответственно;  $B(t)$  — «мгновенный» баланс газа для заданной территории, т.е. разность между интенсивностью эмиссии и стока ПГ (в  $\text{кг}\cdot\text{с}^{-1}$ );  $M(x, y)$  — массовое содержание газа в вертикальном атмосферном столбе единичной площади (в  $\text{кг}\cdot\text{м}^{-2}$ );  $F$  — интегральный по высоте атмосферы горизонтальный поток газа (в  $\text{кг}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$ ).

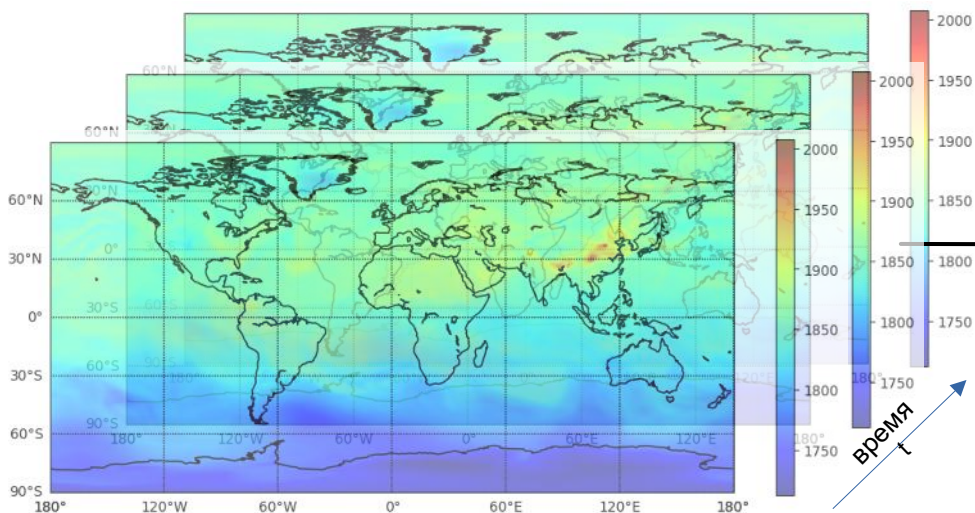
$M(x, y)$  рассчитывается как интеграл плотности (сумма в регионе) (в  $\text{кг}$ )

Помимо концентрации, для вычисления баланса необходимо знать векторное поле потока рассматриваемого газа. Для его получения используется подход предложенный ранее для исследования элементов гидрологического цикла (Ермаков и др., 2023), где в качестве целевого газа рассмотрен водяной пар.

Под «балансом» понимается разность между суммарным выбросом газа в пределах территории и его суммарным стоком

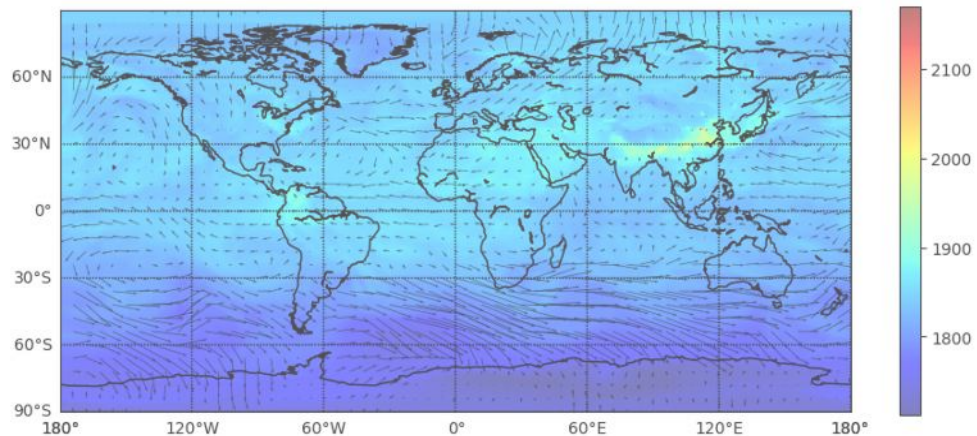


# Постановка задачи и предыстория



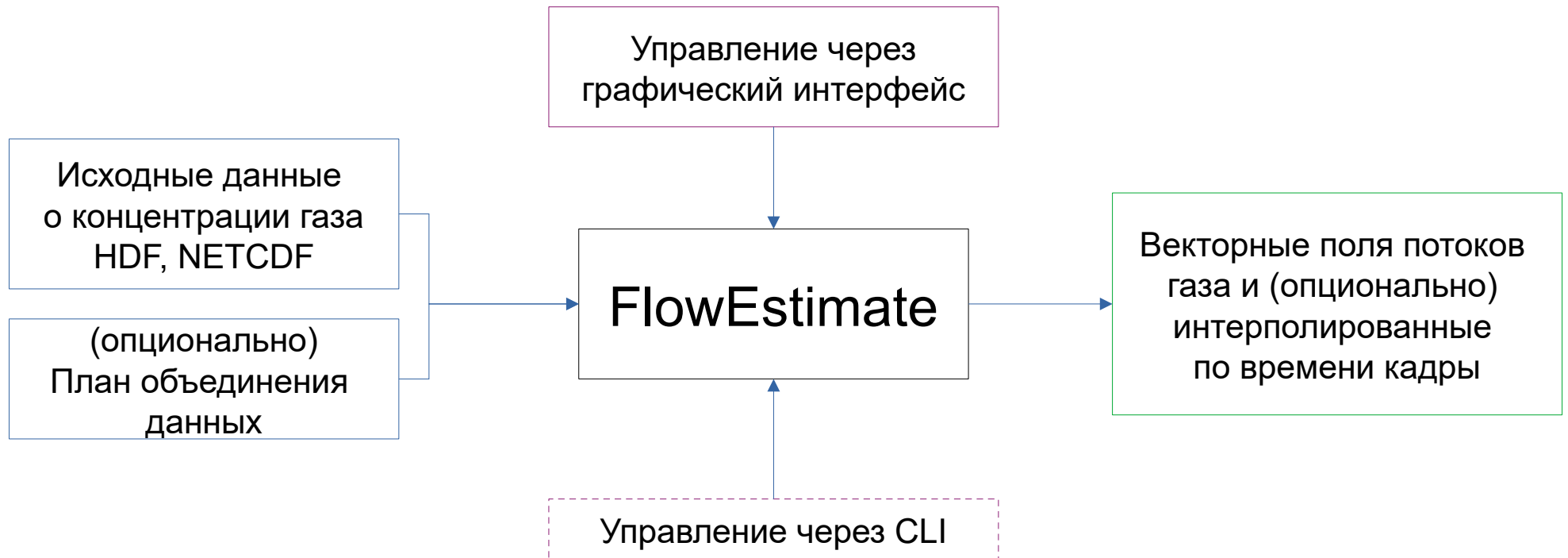
Глобальные поля интегральных значений парниковых газов на регулярной сетке и с регулярной периодичностью

Алгоритм оценки оптического потока



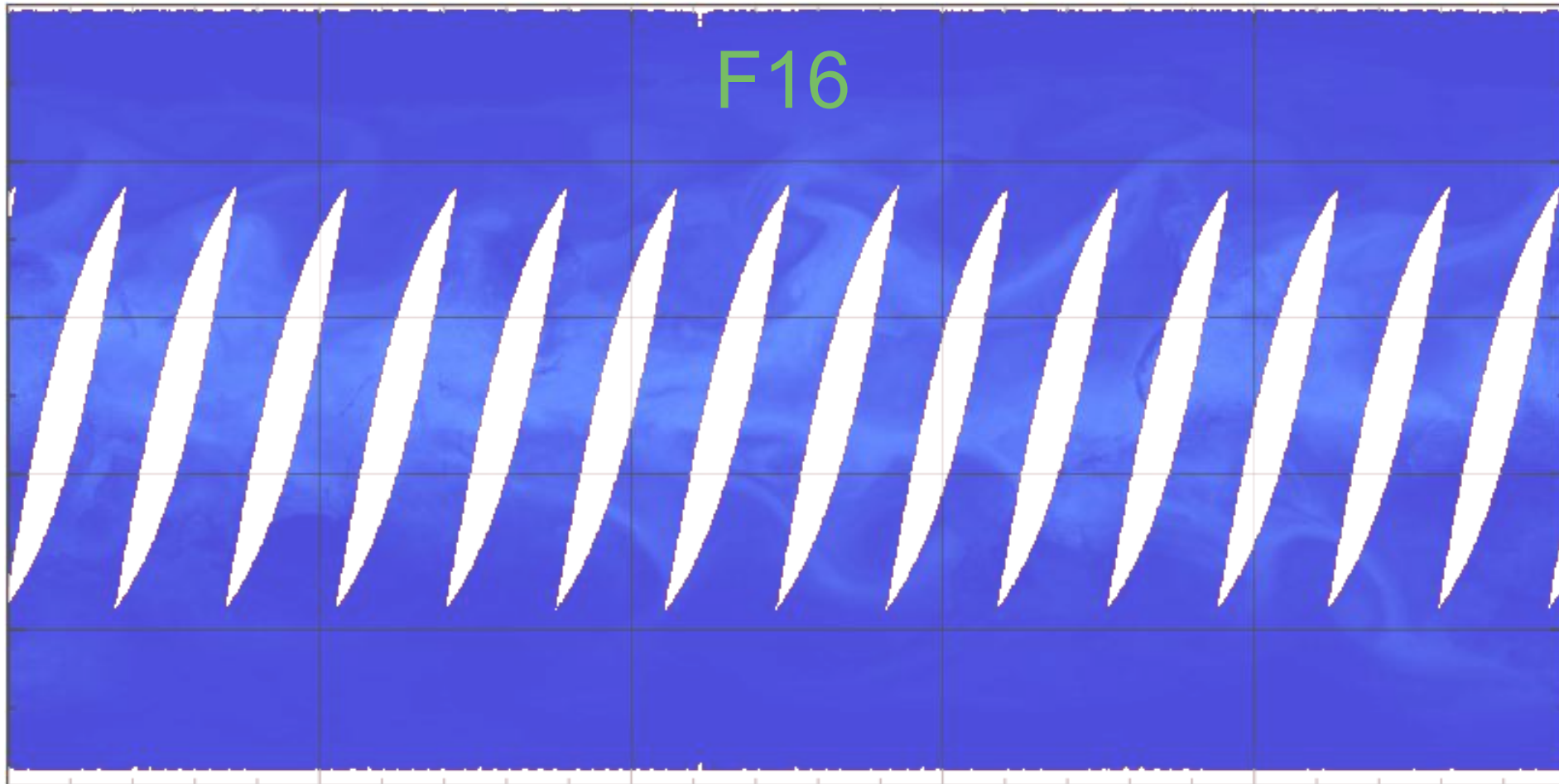
# Программа FlowEstimate

Предназначена для расчёта векторного поля потоков газов или водяного пара в атмосфере при помощи алгоритма оценки оптического потока и объединяет в себе ряд предыдущих наработок по этой теме.



# Подготовка данных

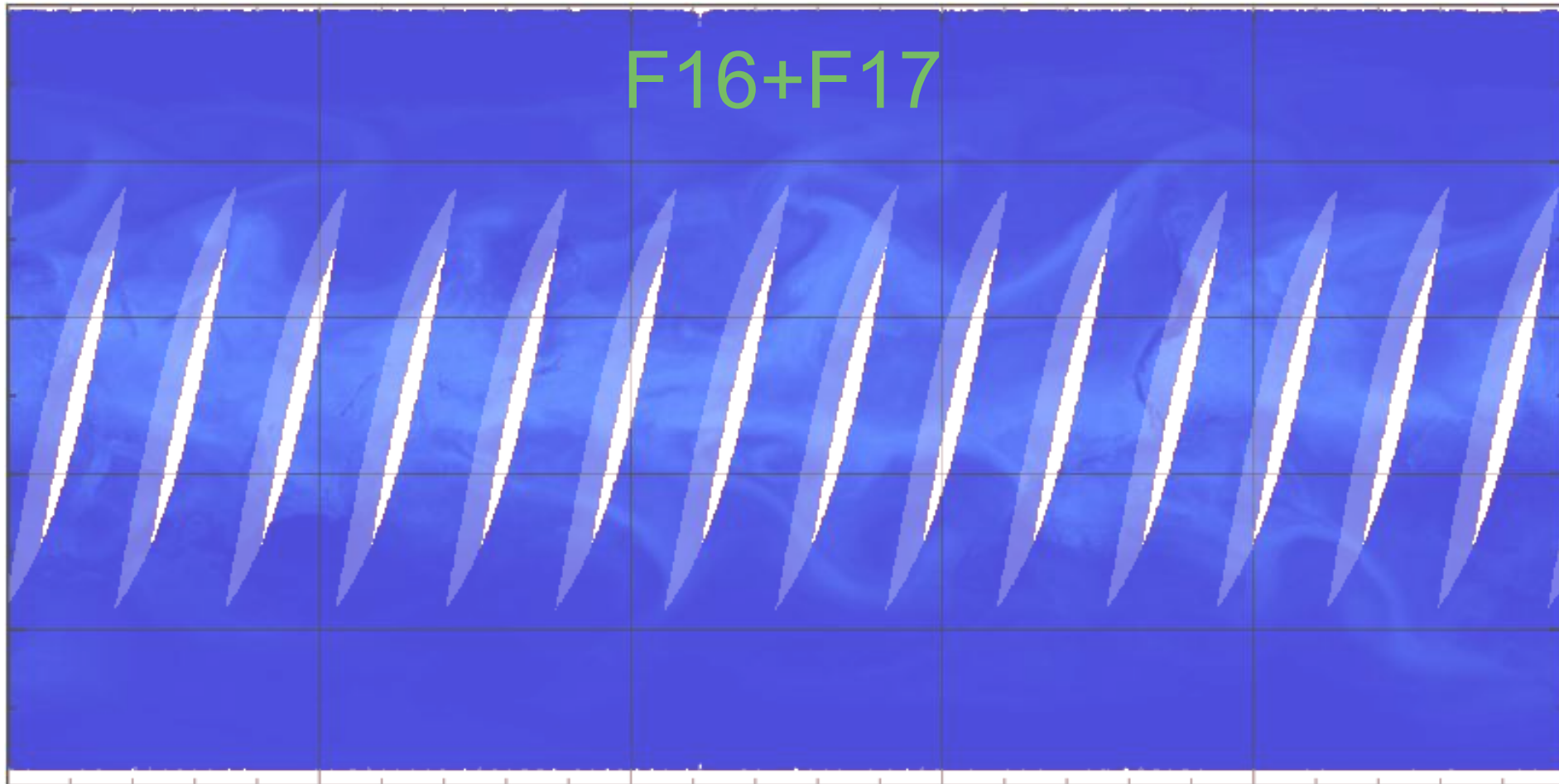
В подготовку входит синтез, при необходимости, изображений из различных источников





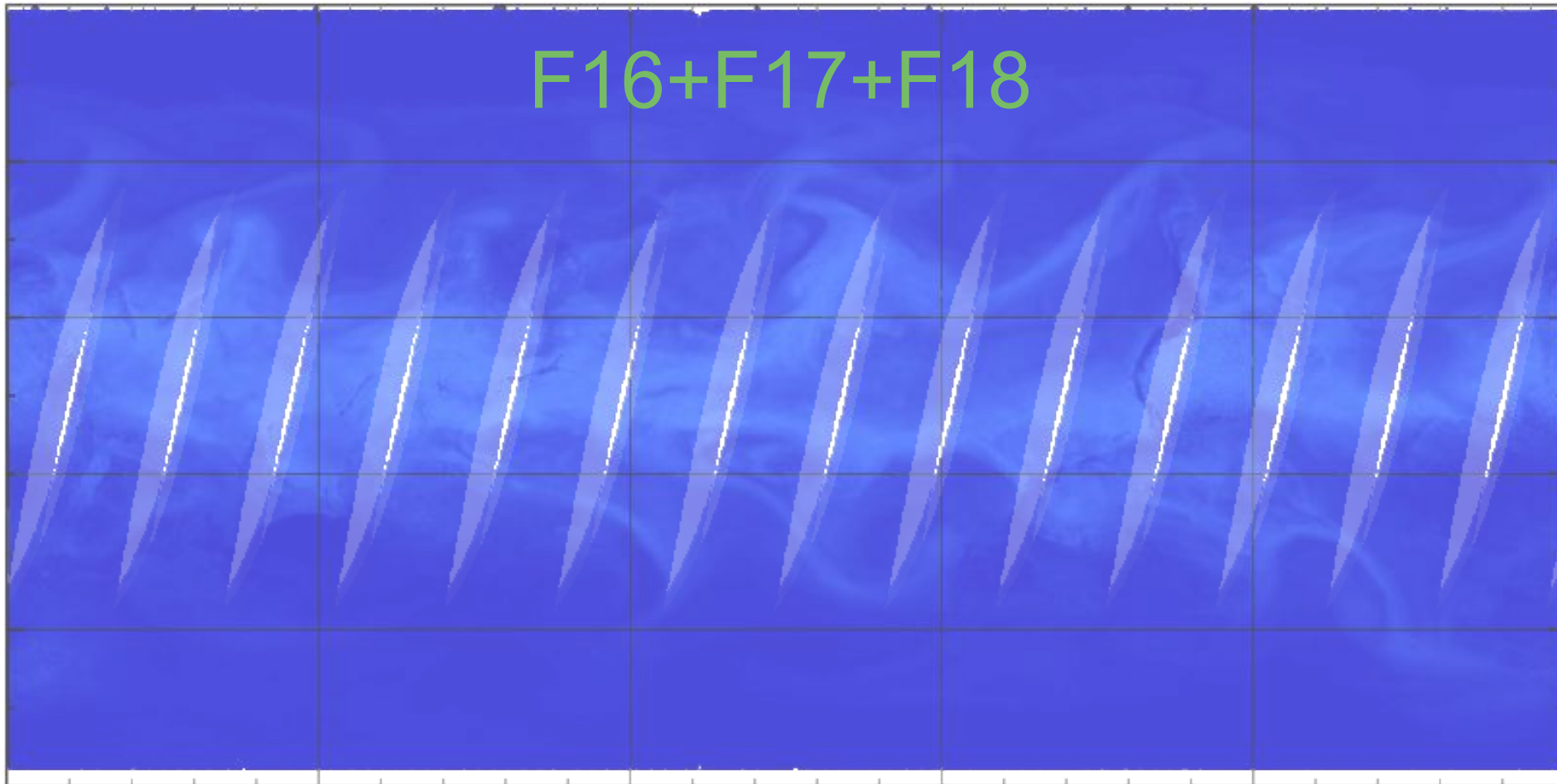
# Подготовка данных

В подготовку входит синтез, при необходимости, изображений из различных источников



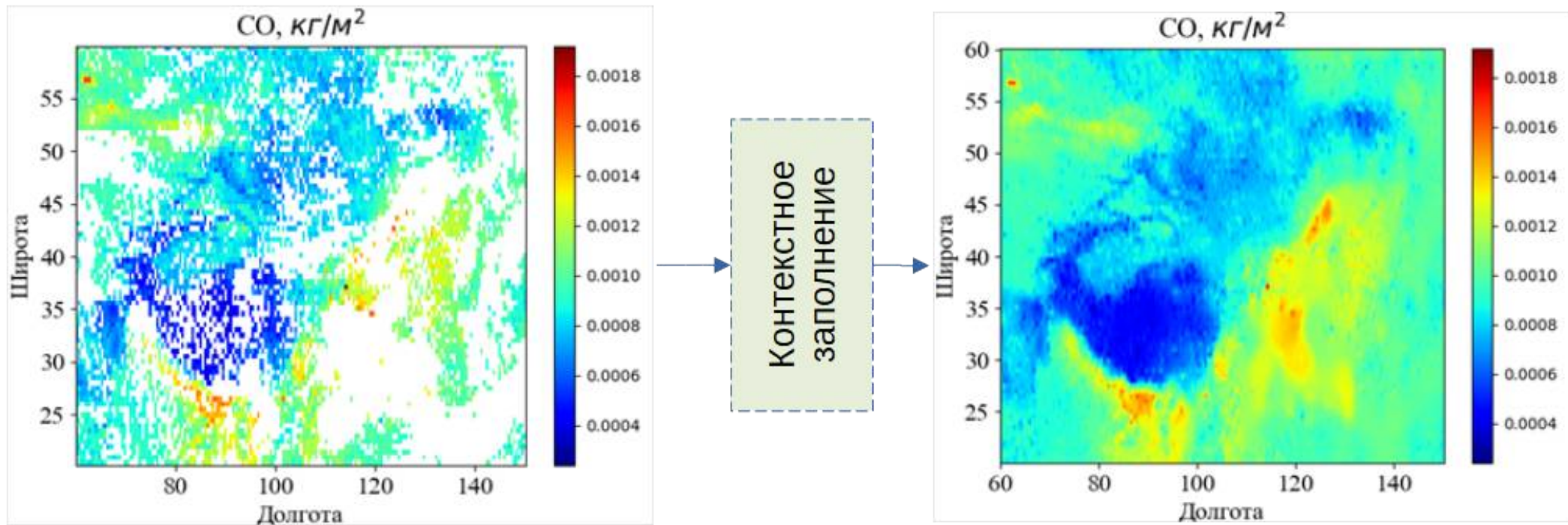
# Подготовка данных

В подготовку входит синтез, при необходимости, изображений из различных источников



# Подготовка данных

заполнение лакун в данных, позволяющее получить пригодное для дальнейшей обработки изображение.



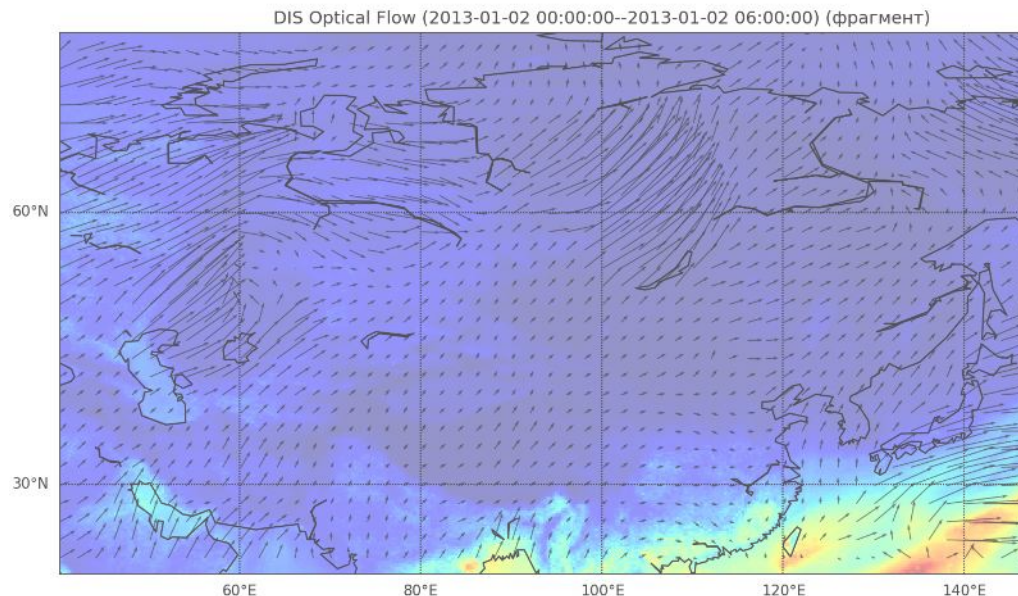


# Оценка оптического потока

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

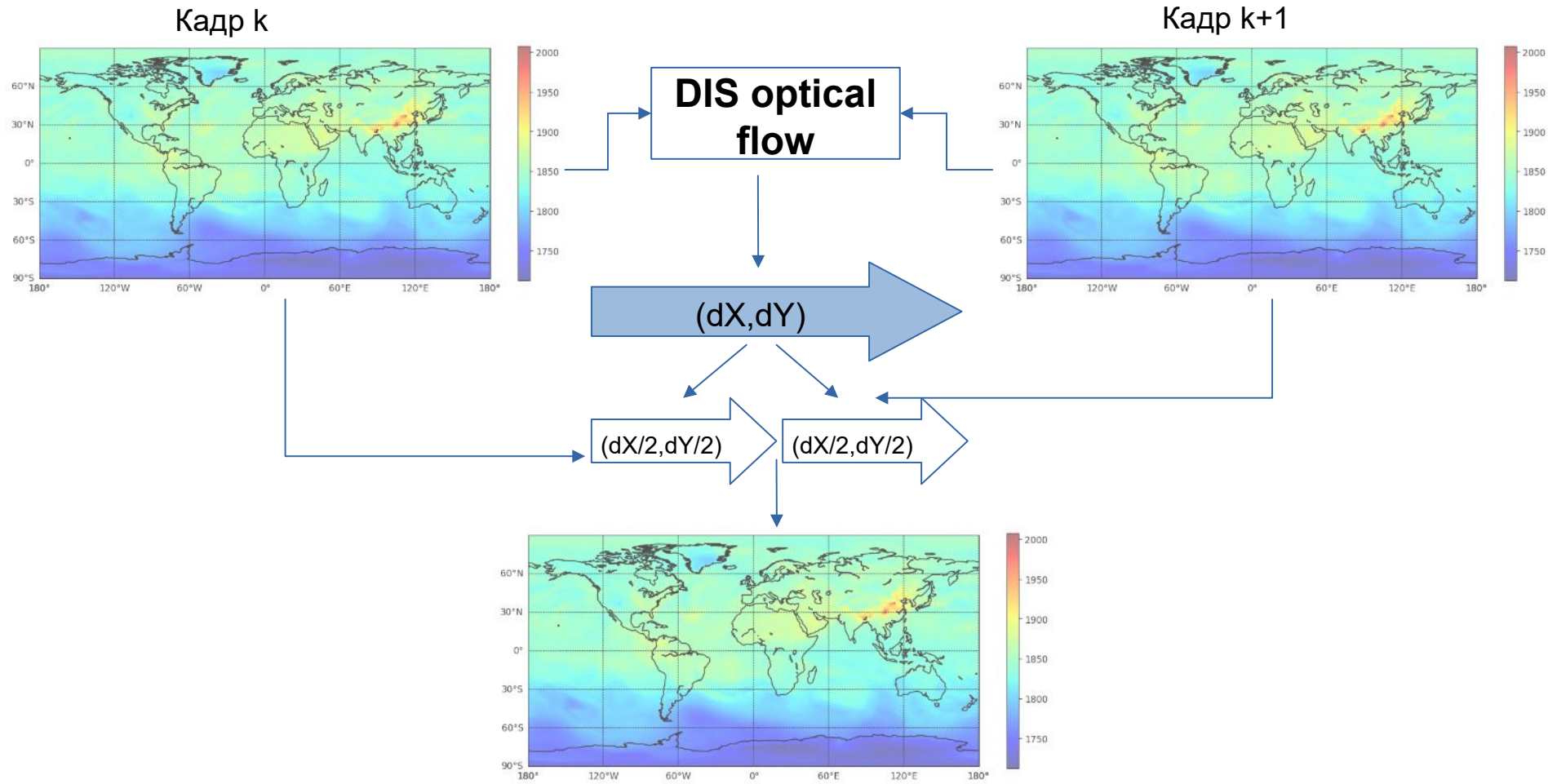
Преимущества для данной задачи:

- 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

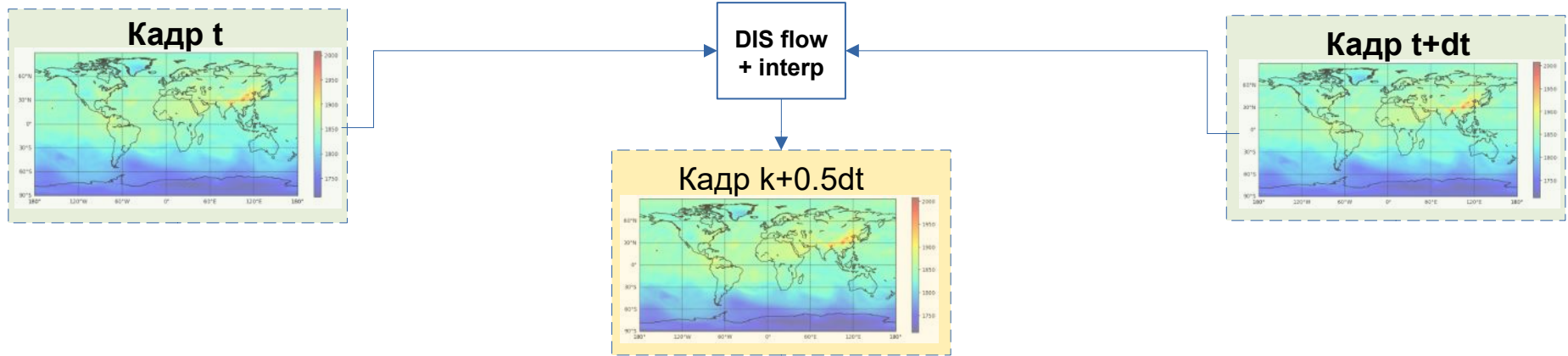


Используется реализация из открытой библиотеки openCV

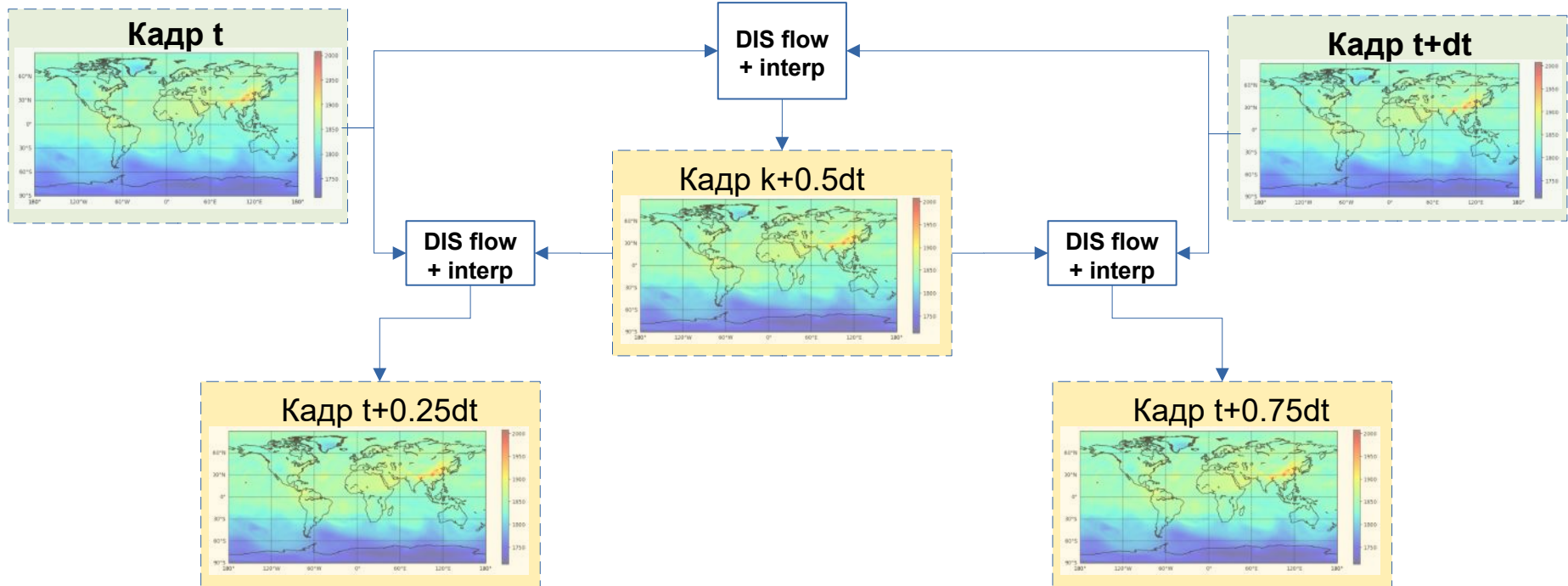
# Построение интерполяционного кадра



# Рекурсивное построение интерполяционных кадров

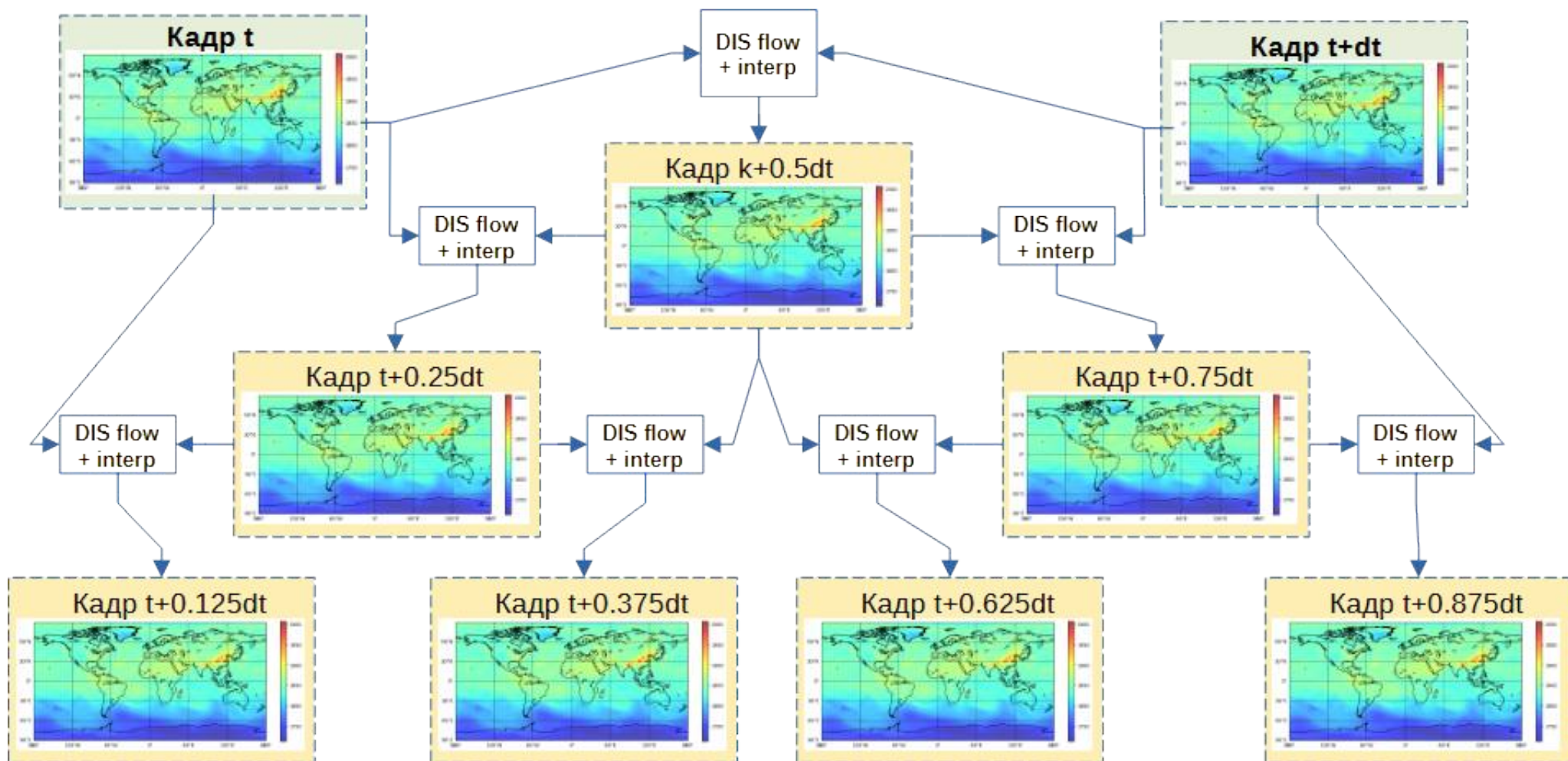


# Рекурсивное построение интерполяционных кадров

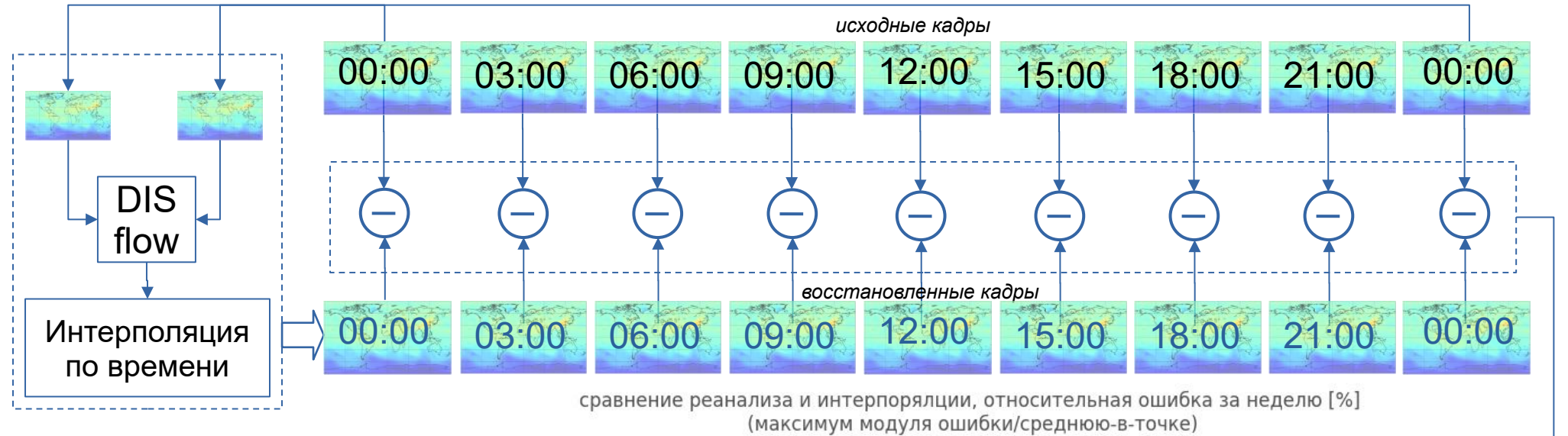




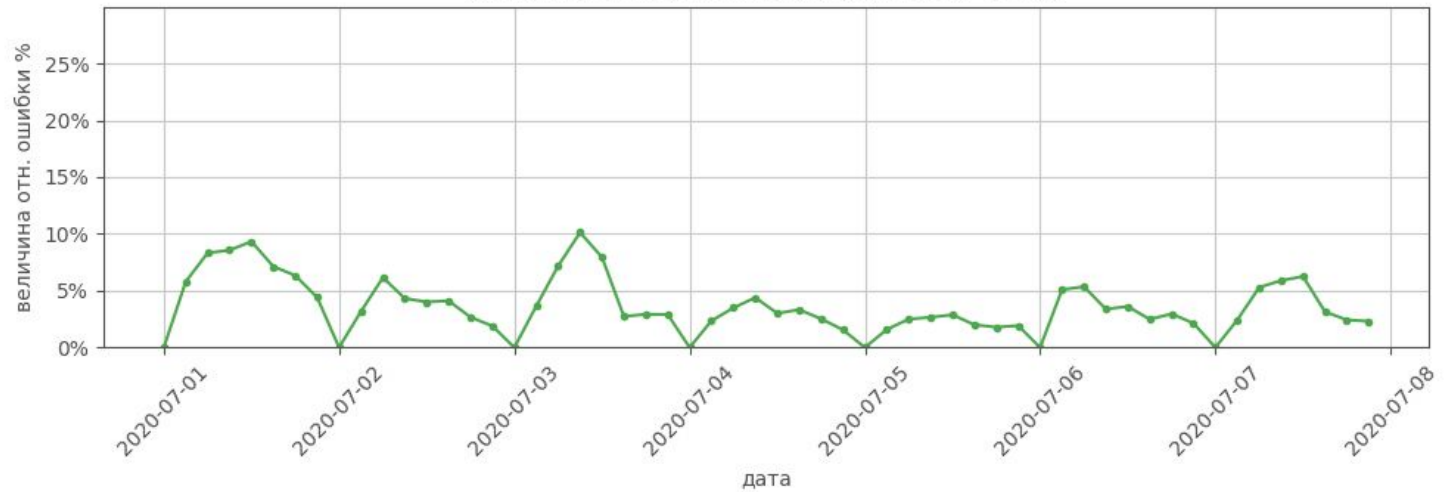
# Рекурсивное построение интерполяционных кадров



# Оценка точности интерполяции для расчёта баланса



Для сравнения  
использовались  
данные реанализа



# Интерфейс

Все эти возможности гибко управляются при помощи графического локального веб-интерфейса, что в дальнейшем может упростить встраивание в более комплексную систему.

ALL BASE OF PWV DATA    PWV FROM FILE OR DIR    PWV FROM FILE OR HDFS

src file  
.\data-link\HDF

.\data-link\HDF   

... Available range of dates: ...

from date        PROCESS TO THE END    TO DATE     debug preview calc    count of preview calc frames  
6

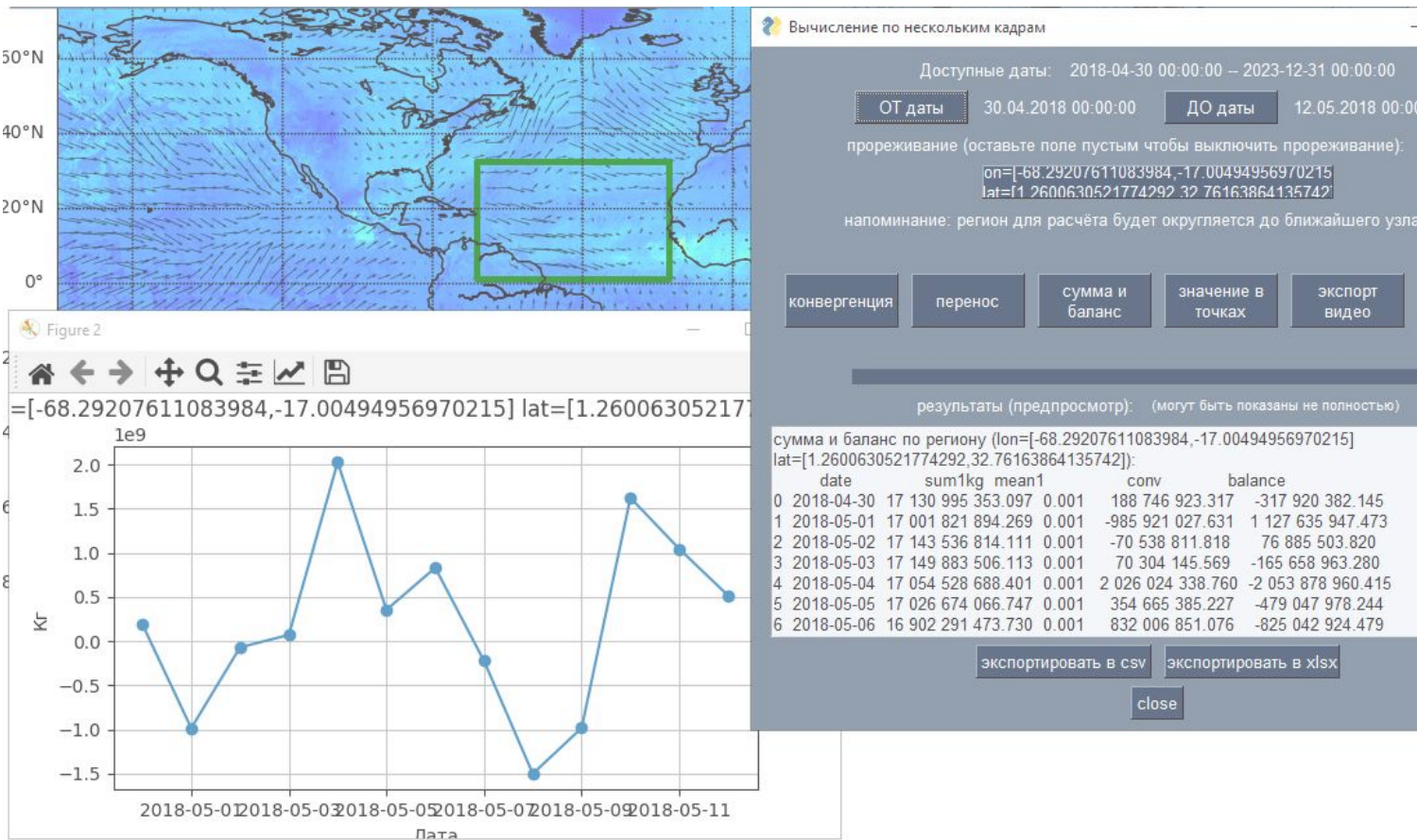
type of move for interp    1..2..3..4    level (recurse deep) of interpolation     интерп. кадр как среднее между прямым и обратным движением  
xr    2

out dir    out name base     формировать имя из параметров расчёта  
.\data-link\HDF\_outtest\out1ex    flow1

data-link\HDF\_outtest\out1ex\flow1(~~)(Q=6)(2012-01-01-2012-03-01)\_(LVL=2)(mean2side=True).nc

# Расчёт баланса

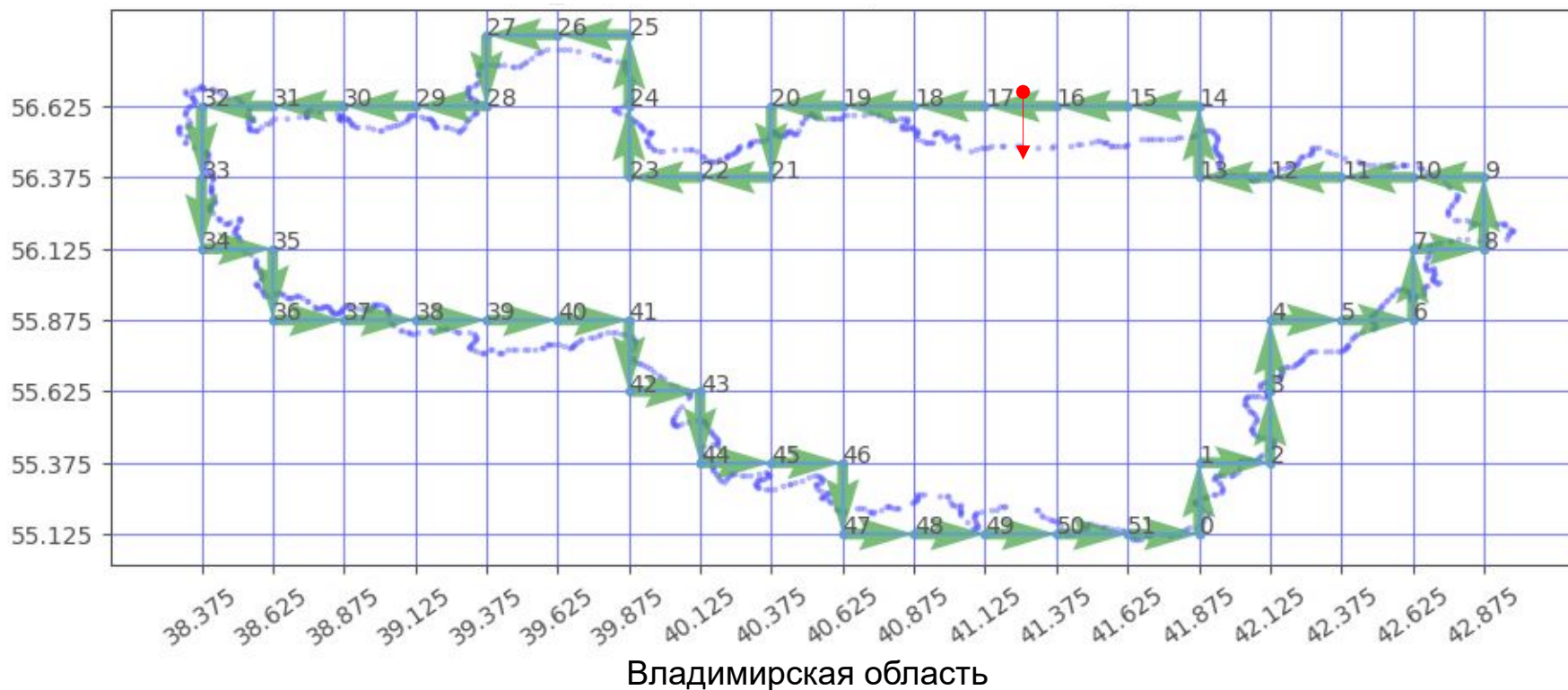
Результаты расчета потоков могут быть, в частности, использованы для расчёта конвергенции и баланса заданной области.





# Расчёт баланса

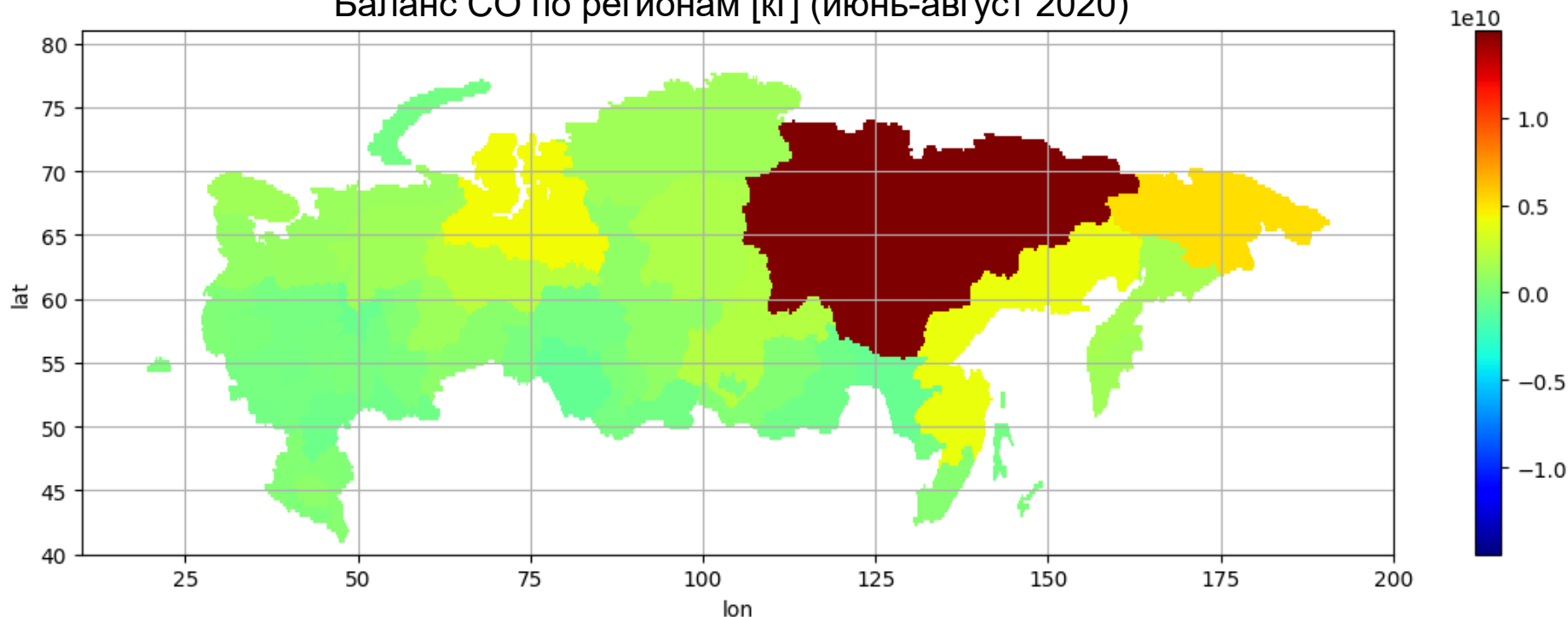
В новой версии расчёта баланса появилась возможность расчёта не только по прямоугольным областям, но и по произвольным регионам, заданным набором точек или растровой маской (с естественными ограничениями на корректность области, отсутствие самопересечений и вырезанных участков).



# Расчёт баланса

Возможность расчёта по криволинейным траекториям в частности, позволила сделать расчёт баланса водяного пара (2012–2023 годы) и угарного газа (CO) (за 2018–2023 годы) в атмосфере по границам административных регионов.

Баланс CO по регионам [кг] (июнь-август 2020)

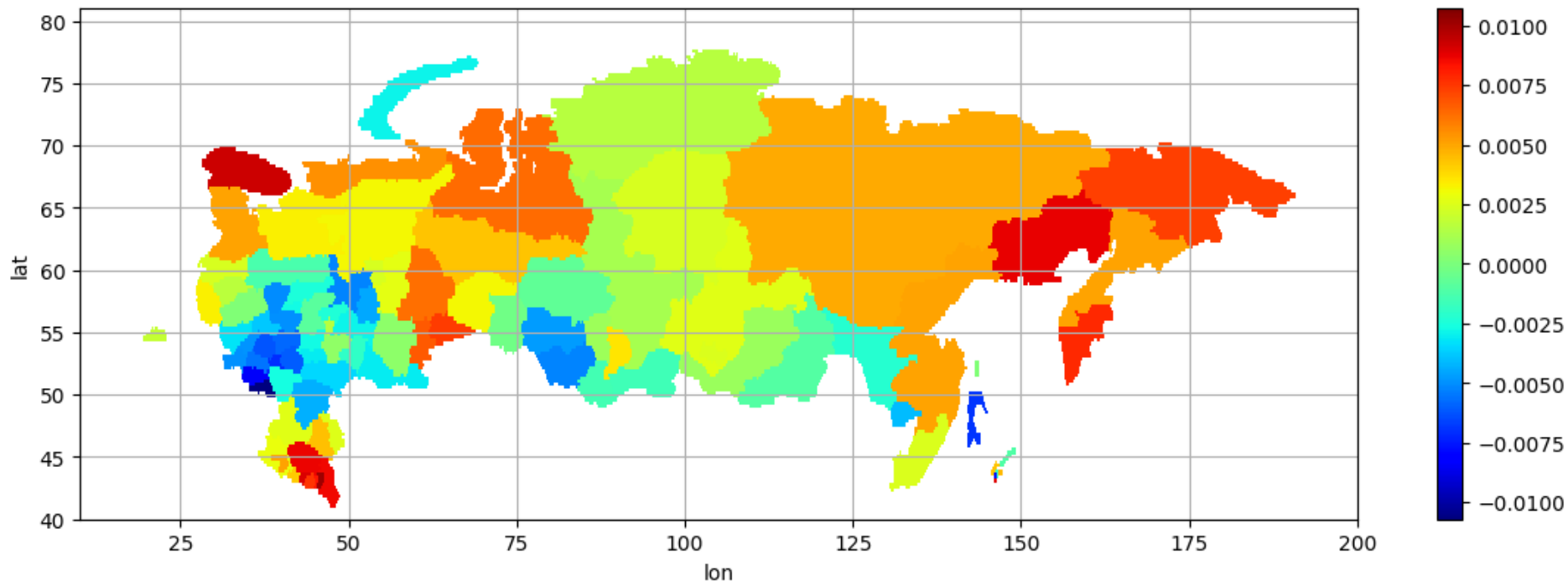


По данным Тромпи

# Расчёт баланса

Возможность расчёта по криволинейным траекториям в частности, позволила сделать расчёт баланса водяного пара (2012–2023 годы) и угарного газа (CO) (за 2018–2023 годы) в атмосфере по границам административных регионов.

Баланс CO по регионам относительно площади [кг/м<sup>2</sup>] (июнь-август 2020)



По данным Тромпи

# Выводы



Разработанные программы позволяют оценивать потоки газов (в том числе парниковых) и водяного пара по данным концентрации.

Результаты расчета потоков могут быть, в частности, использованы для расчёта конвергенции и баланса заданной области.

Появилась возможность расчёта не только по прямоугольным областям, но и по произвольным регионам

---

*Программа «FlowEstimate» зарегистрирована в качестве результата интеллектуальной деятельности (свидетельство №2024669140).*

---

Работа выполнена при поддержке темы «Эмиссия» (гос. Регистрация № 122101700045-7).

---



Спасибо за внимание

# Упомянутая литература

1. Ermakov D.M., Pashinov E.V., Kuz'min A.V. et al., The concept of calculating the elements of the regional hydrological balance with the use of satellite radiothermovision, *Gidrometeorologiya i ekhologiya*, 2023, No. 72, pp. 470–493 (in Russian), DOI: 10.33933/2713-3001-2023-72-470-492.
2. Ermakov D.M., Raev M.D., Chernushich A.P., Sharkov E.A. Algorithm for construction of global ocean-atmosphere radiothermal fields with high spatiotemporal sampling based on satellite microwave measurements // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2019, Vol. 55, No. 9, pp. 1041–1052. doi: 10.1134/S0001433819090159. <https://link.springer.com/article/10.1134/S0001433819090159>
3. Пашинов, Е. В., et al. "Отработка методики балансовых расчётов выбросов парниковых газов по данным спутникового мониторинга на примере крупных лесных пожаров."
4. Farnebäck 2003: Farnebäck G. Two-Frame Motion Estimation Based on Polynomial Expansion // *Image Analysis, 13th Scandinavian Conference, SCIA 2003, Halmstad, Sweden, June 29 - July 2, 2003, Proceedings* / ed. Bigün J., Gustavsson T. Springer, 2003. Vol. 2749. P. 363–370.
5. Kroeger T. et al. 2016: Kroeger T. et al. Fast optical flow using dense inverse search // *European conference on computer vision*. Springer, 2016. P. 471–488.
6. Bouguet 1999: Bouguet J.-Y. Pyramidal implementation of the lucas kanade feature tracker. 1999.
7. Baker 2004: Baker S., Matthews I. Lucas-kanade 20 years on: A unifying framework // *International journal of computer vision*. Springer, 2004. Vol. 56. P. 221–255.