

Совершенствование методов предварительной обработки данных для расчёта горизонтальных потоков парниковых газов в атмосфере

Втюрин С.А.

Ермаков Д.М. д.ф.-м.н.

Пашинов Е.В. к.ф.-м.н.

Секция: Методы и алгоритмы обработки спутниковых данных

Ключевые слова: программное обеспечение, анализ данных, дистанционное зондирование, атмосферная динамика, цифровая обработка изображений
Работа выполнена при поддержке темы «Эмиссия» (гос. Регистрация № 12511112878-8).

Введение: проблемы при оценке потоков

В молодёжной лаборатории ИКИ РАН разрабатывается программа FlowEstimate, которая предназначена для расчёта векторного поля горизонтальных потоков парниковых газов при помощи алгоритма оценки оптического потока. В этом докладе рассматриваются усовершенствованные методы подготовки исходных данных для такого расчёта.

При работе с реальными данными о концентрации водяного пара и, в большей степени, угарного газа возникает ряд проблем, затрудняющих оценку потока.

В работе рассмотрено решение следующих вопросов:

- Значительные лакуны в сырых данных создают ложные контрасты на границах областей реальных данных.
- Большой динамический диапазон величин исходных данных. Большинство пикселей содержит фоновые значения в узком диапазоне, при этом часть пикселей также содержит важные данные об аномалиях, часто являющихся областью интереса, но при этом значительно отличается по величине сигнала. Таким образом, сырой сигнал не оптимален для оценки оптического потока.
- Также рассмотрен вопрос оптимизации процесса переноса данных на регулярную сетку.

Перенос данных на регулярную сетку 0.25x0.25

Исходные данные о концентрации представлены в файлах GEOTIFF на сетке размерностью (7272x2857) и шагом, меняющимся из-за погрешностей использованного представления в виде числа с плавающей точкой (см. таблицу справа). Подобные различия почти не значимы с практической точки зрения, однако вносят некоторые неудобства и неоднозначности при вычислениях, ожидающих строгую равномерность в сетке.

Первым этапом обработки данных был перенос на сетку с равномерным шагом 0.25x0.25 градусов по широте и долготе соответственно. Обозначим $\text{stepLon}=0.25$, $\text{stepLat}=0.25$.

В ранних реализациях в качестве значения для узла новой сетки $I_{\text{lat},\text{lon}}$ использовалось значение из узла исходной сетки $I_{0,\text{lat}0,\text{lon}0}$, расположенного наиболее близко к исходному, т. е. из условия $\min(\text{lat}-\text{lat}0)$ и $\min(\text{lon}-\text{lon}0)$.

Текущая реализация использует другой принцип: в окрестностях каждого нового узла сетки выделяется область с границами $[\text{lon}-\text{stepLon}/2, \text{lon}+\text{stepLon}/2]$ $[\text{Lat}-\text{stepLat}/2, \text{lat}+\text{stepLat}/2]$. И в качестве значения в узле новой сетки используется среднее значение всех значимых точек исходной сетки, попавших в эту область. Здесь «значимых» означает что при вычислении среднего игнорируются точки, не содержащие корректных исходных данных. Такой подход позволяет сгладить ошибочные выбросы в данных, а также более полно использовать информацию в ячейках, содержащих лакуны.

Значения шага исходной координатной сетки по долготе

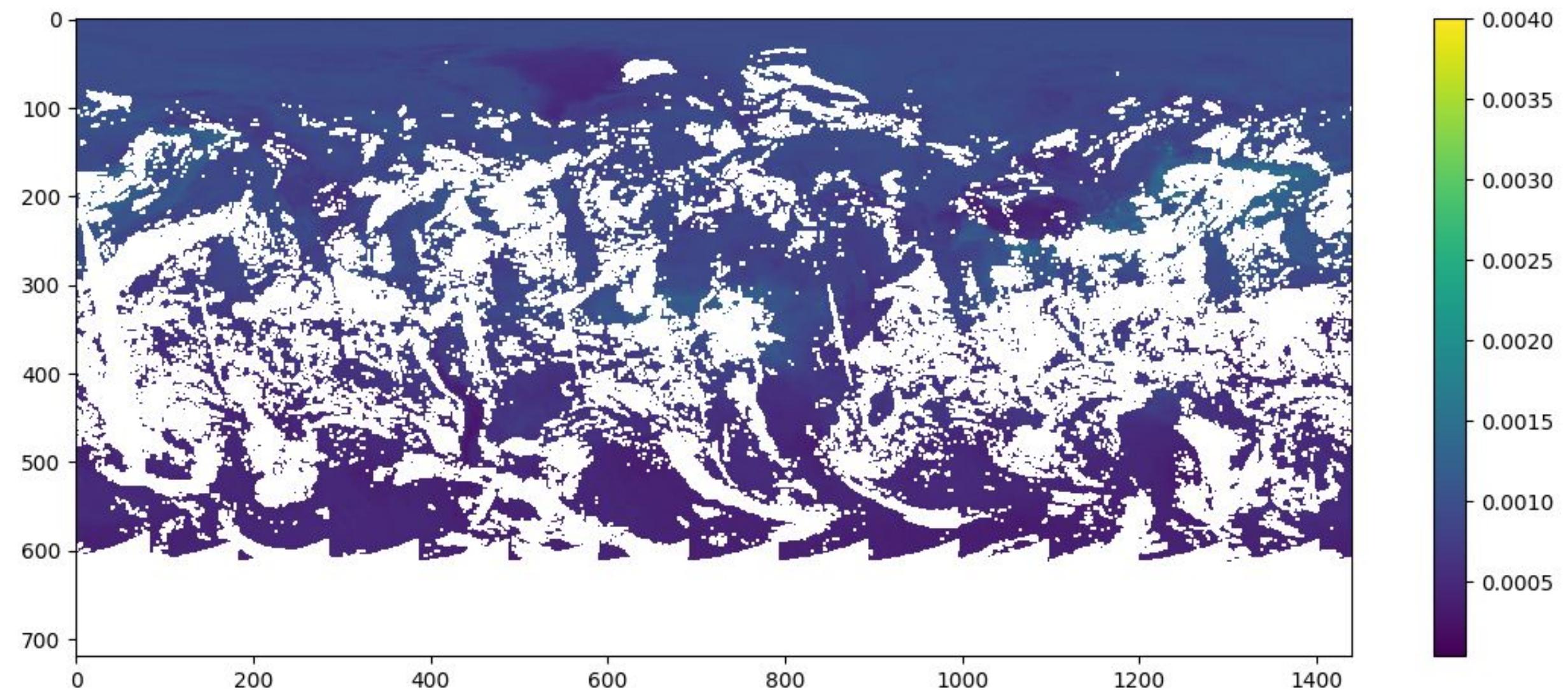
0.04950495049502024
0.04950495049504866
0.04950495049506287
0.04950495049507708

Значения шага исходной координатной сетки по широте

0.06300315015749902
0.06300315015750613
0.06300315015751323
0.06300315015752744

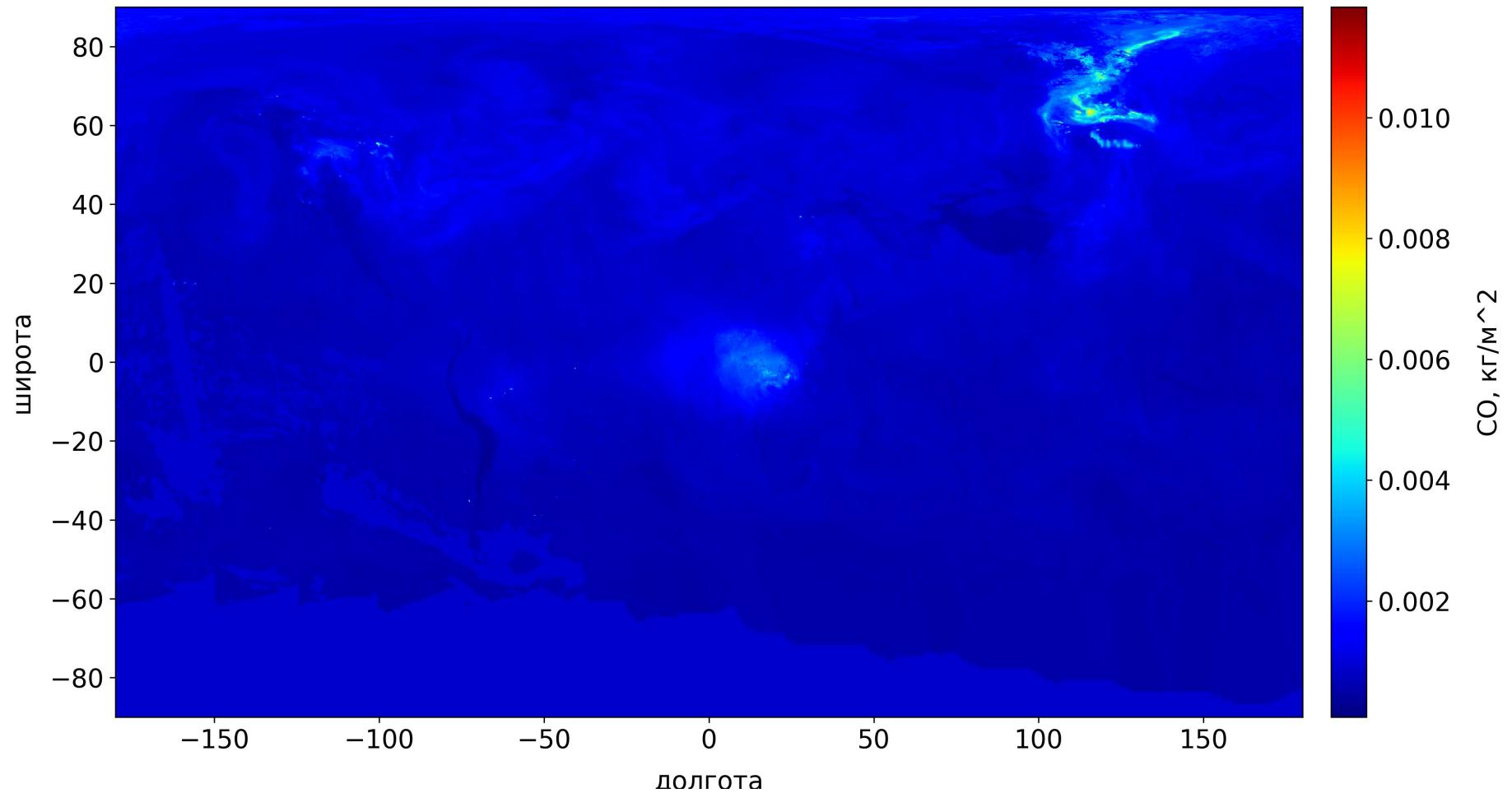
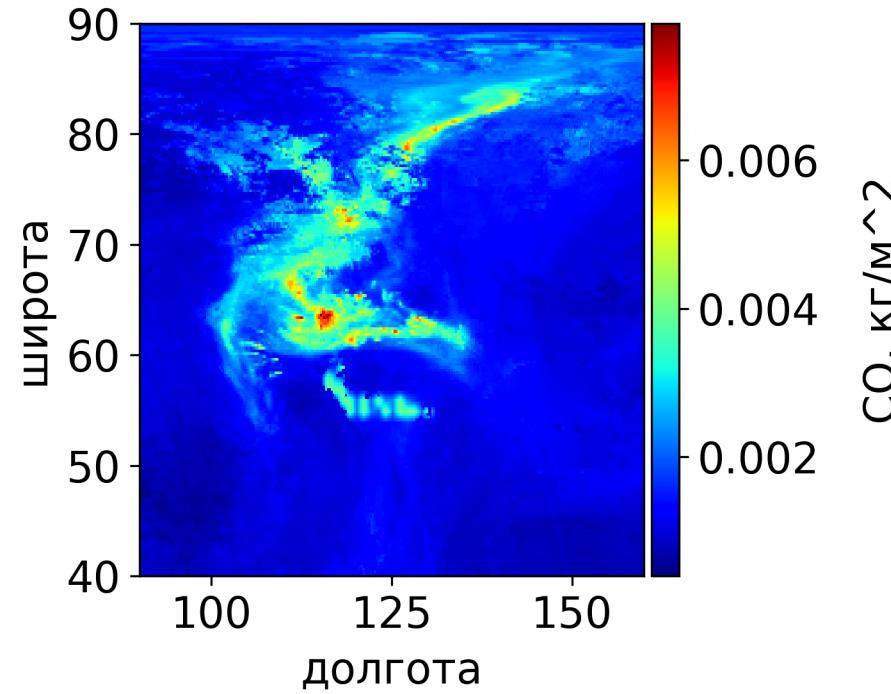
Процесс заполнения лакун

Исходные данные о концентрации содержат лакуны, однако для поиска оптического потока требуется исходная пара кадров в полном виде без пропусков. Таким образом, требуется временно закрыть пропуски таким образом чтобы это имитировало корректные данные. Использовать для закрытия лакун просто постоянное значение не очень эффективно, так как это создаёт ложные контрасты на краях реальных данных.



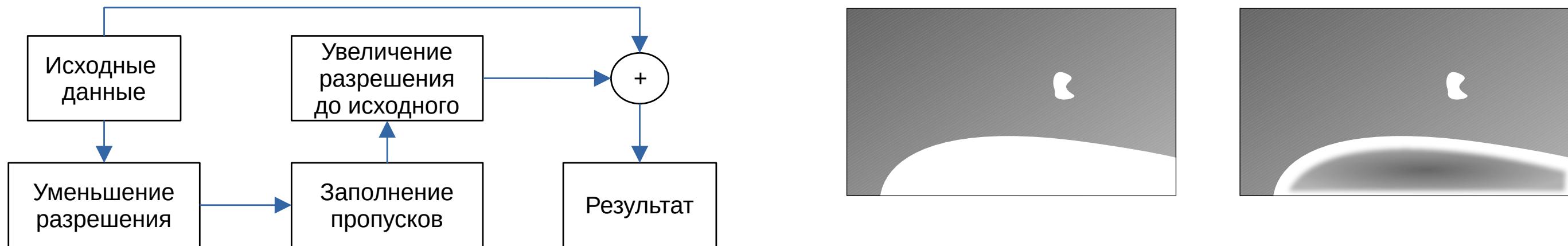
История вопроса: предыдущее решение

Предыдущая реализация использовала функцию `inpaint` из открытой библиотеки `openCV`, показавшую достаточно приемлемые результаты при работе с данными по водяному пару. Однако в данных по угарному газу, где лакуны представляют собой довольно обширные области, прямое её применение создаёт ряд проблем: неравномерность на больших областях, артефакты внутри заполняемой области, размножение ошибочных или неоднородных данных, оказавшихся на краях области.



Улучшенный процесс заполнения лакун

Однако её возможности можно продолжить использовать, если обеспечить необходимые условия: заполняемая область должна быть невелика в абсолютном выражении и должна содержать в окрестностях реальные данные. Для обеспечения этих условий можно применить несколько искусственных приёмов. Один состоит в представлении изображения в более низком разрешении, что уменьшает размеры заполняемой области. После заполнения изображение можно снова представить в более высоком разрешении, используя для заполненных областей интерполяцию, а для областей реальных данных- сами исходные данные (см блок-схему слева).



Второй приём используется для лакун большого размера, а также областей, не содержащих исходных данных на краях: в этом случае заполняемая область искусственно ограничивается небольшой областью возле краёв реальных данных. Остальная часть большой лакуны заполняется постоянным значением (медианным значением для кадра) и сглаживается при помощи размытия по Гауссу. Схематично это показано на рисунке справа, где линейный градиент обозначает области реальных данных, белым показаны контекстно-заполняемые области, а радиальный градиент с размытием- заполнение медианным значением со сглаживанием.

Улучшенный процесс заполнения лакун

Исходное изображение I_0 сохраняется отдельно.

I_0

Уменьшение разрешения (downscale) изображения на фиксированный коэффициент (в текущей реализации `downScaleCoef=4`).

I_{ds}

Для I_{ds} при помощи процедуры `erode` (с радиусом 10) строится маска M_{edge} в которую входят только области в непосредственной близости к реальным данным.

M_{edge}

Заполнение лакун в I_{ds} при помощи `cv2.inpaint` с маской M_{edge} . Благодаря п.1 большая часть лакун уменьшается по абсолютной площади и негативные эффекты не проявляются. Большие по площади лакуны защищены маской M_{edge} .

I_{ds1}

Оставшиеся пропуски заполняются медианным значением, вычисленными в окрестностях краёв реальных данных. В заполненных таким образом областях проводится размытие по Гауссу (ядро 19x19, $\sigma=10$)

I_{ds2}

I_{ds2} увеличивается до размера исходного изображения I_0 путём линейной интерполяции.

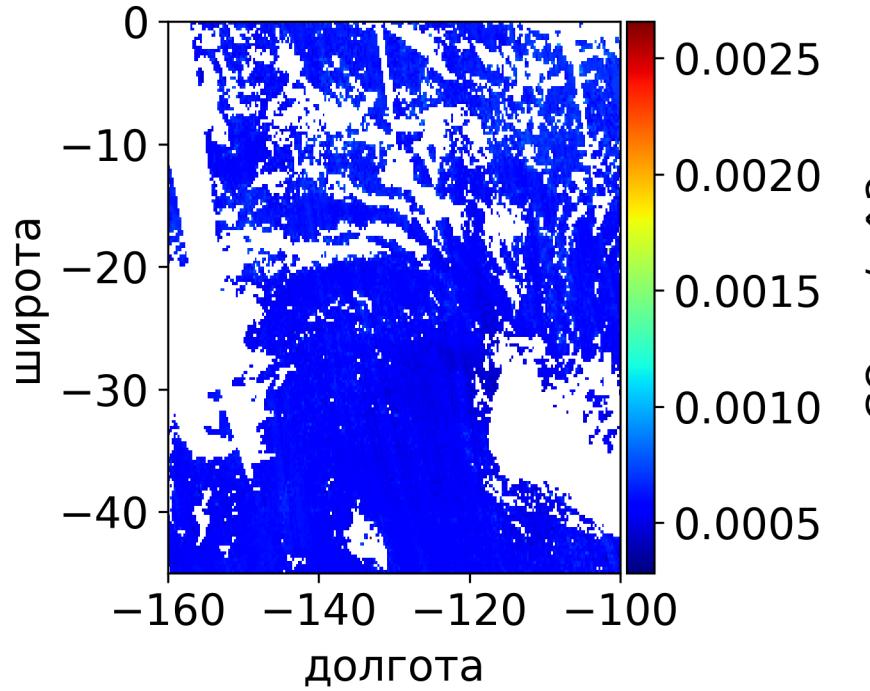
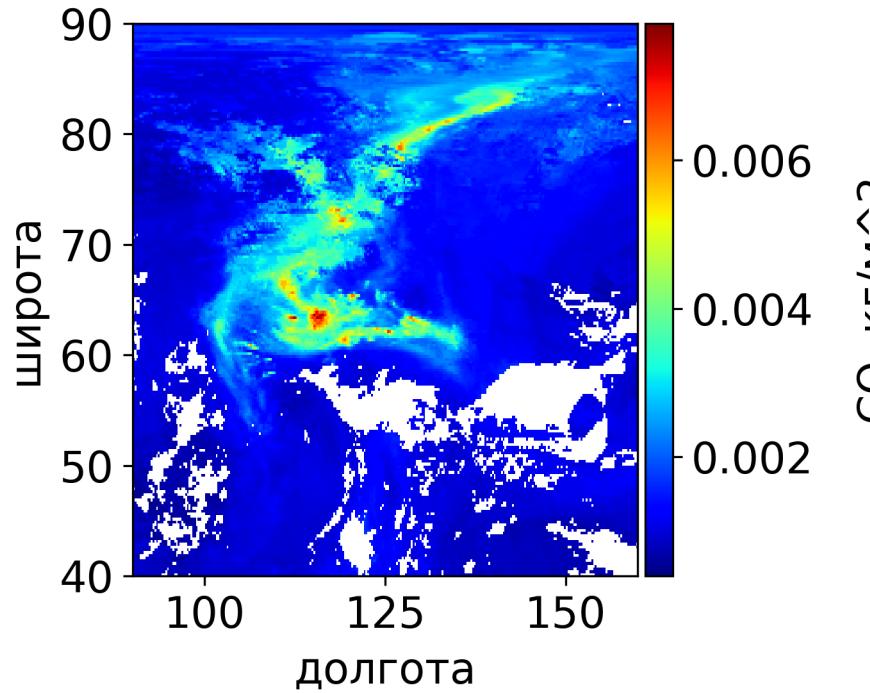
I_{us}

Итоговое заполненное изображение I_{out} строится как комбинация I_{us} в тех точках, где реальные данные отсутствовали и I_0 во всех остальных.

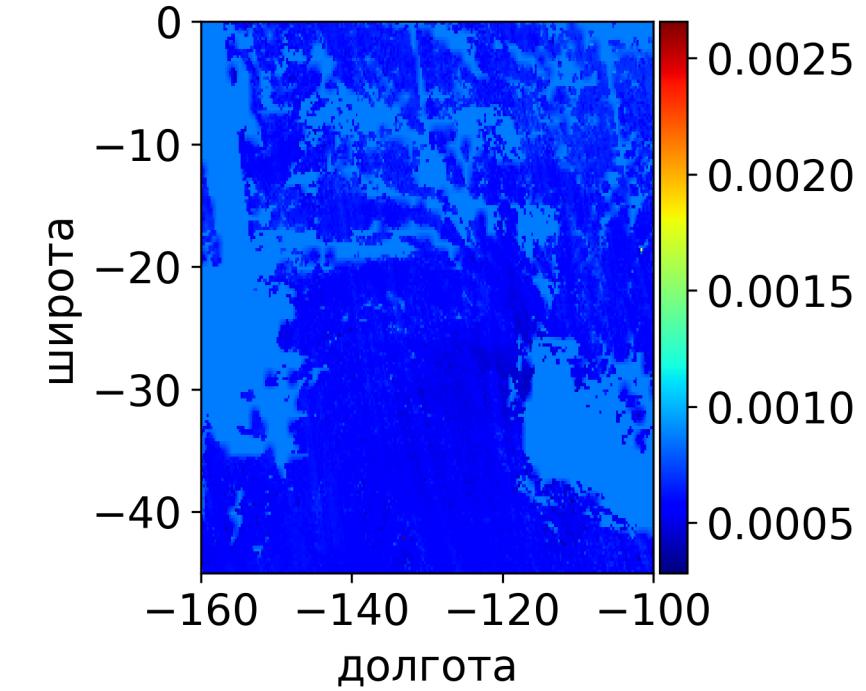
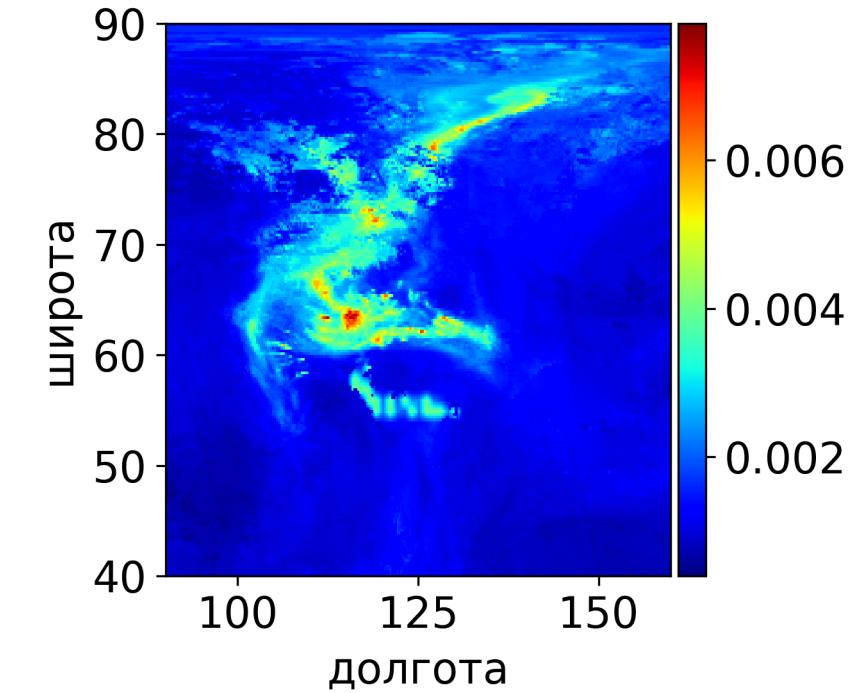
$$I_{out} = \begin{cases} I_{us}, & \text{isNan}(I_0) \\ I_0, & \text{иначе} \end{cases}$$

Улучшенный процесс заполнения лакун: примеры

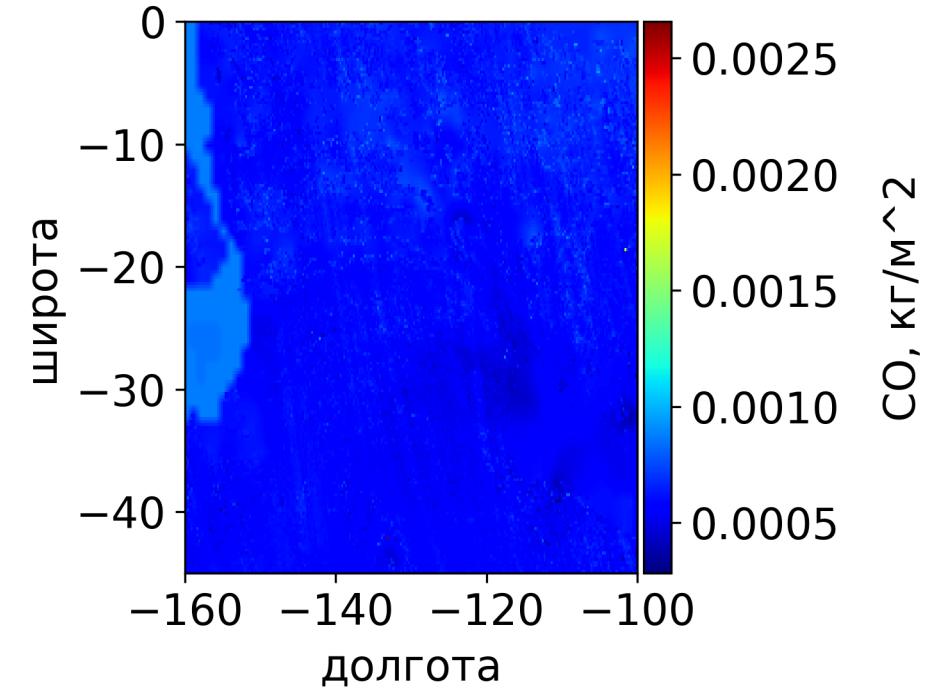
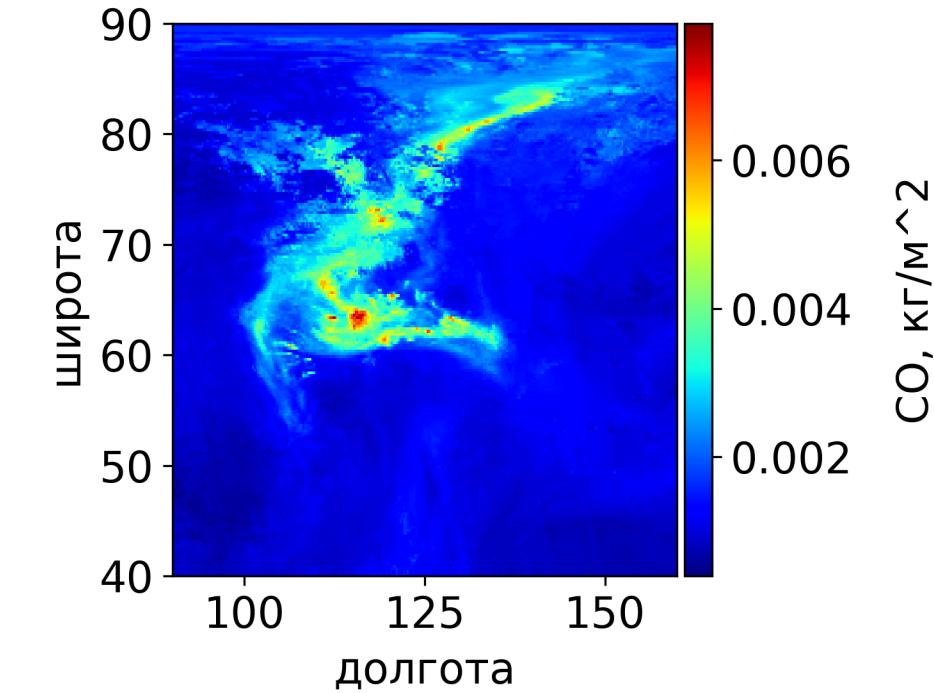
Фрагмент исходных данных



Заполнение *inpaint*



Многомасштабное заполнение

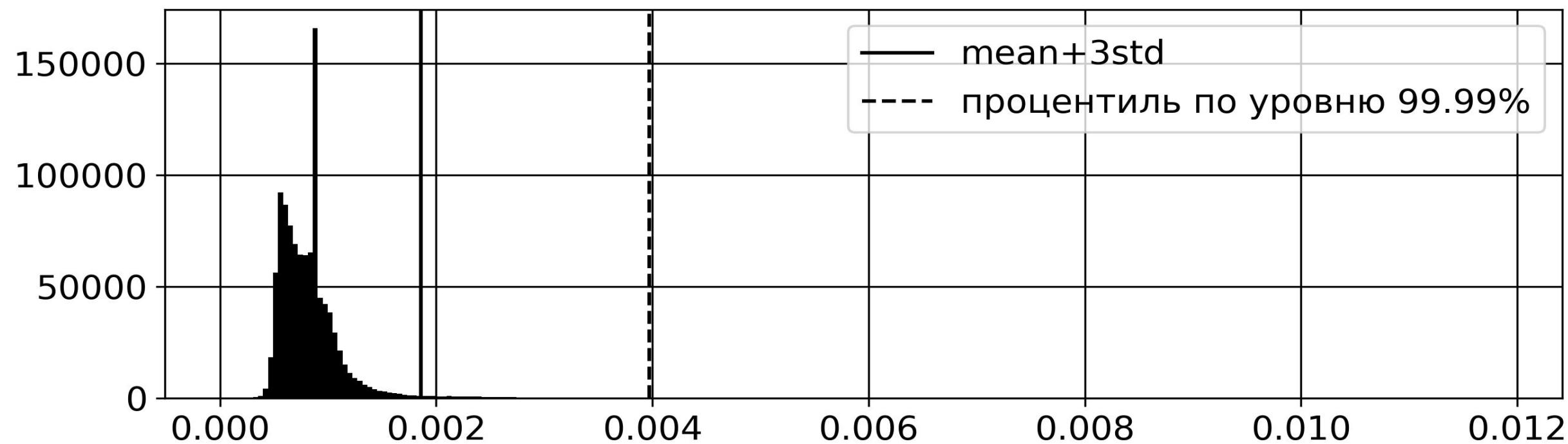


Компрессия данных

В используемой реализации (библиотека opencv, метод Dense Inverse Search (DIS)¹) для поиска оптического потока требуется два исходных кадра в формате 8-битного изображения. Исходные данные о концентрации представлены в формате числа с плавающей точкой. Таким образом в качестве подготовки исходных данных требуется масштабировать кадр в диапазон 0-255 и представить в виде целых значений.

При этом для эффективной работы алгоритма и уменьшения негативных эффектов квантования надо чтобы данные были представлены наиболее полно распределёнными по целевому диапазону.

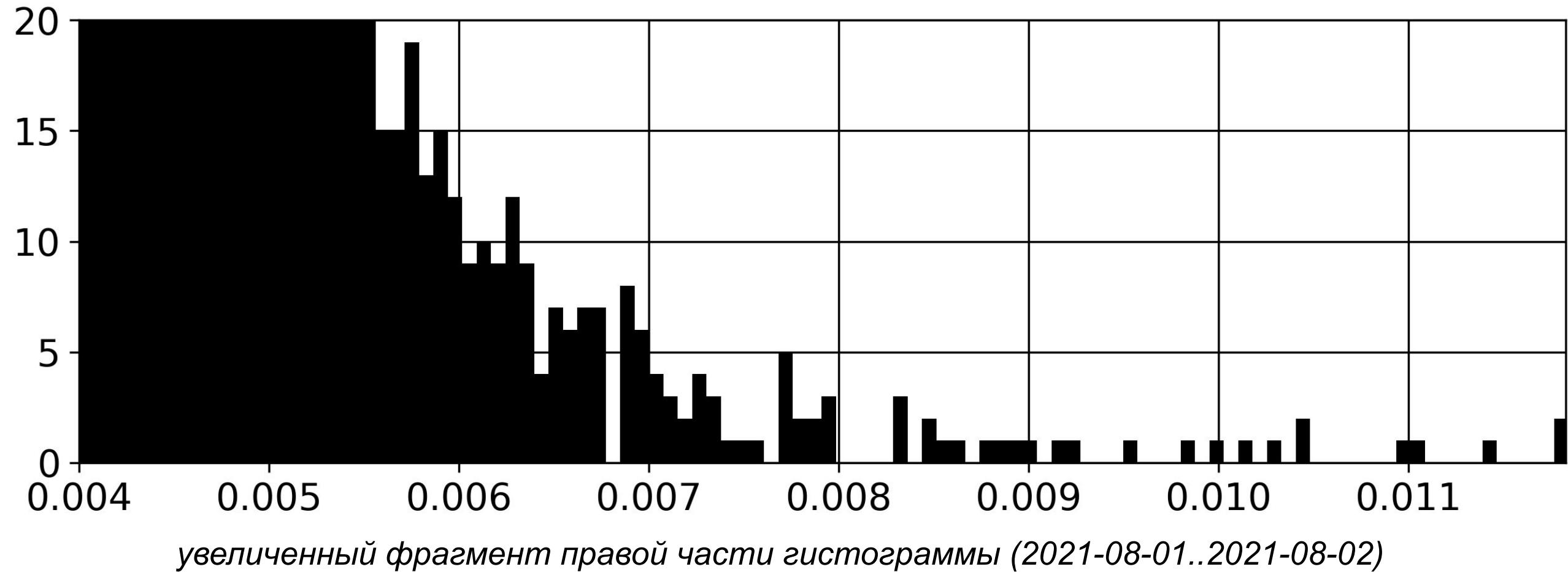
Характер распределения исходных данных по уровням имеет следующий вид, представленный на гистограмме



Гистограмма с отмеченными пороговыми уровнями (2021-08-01)

Компрессия данных

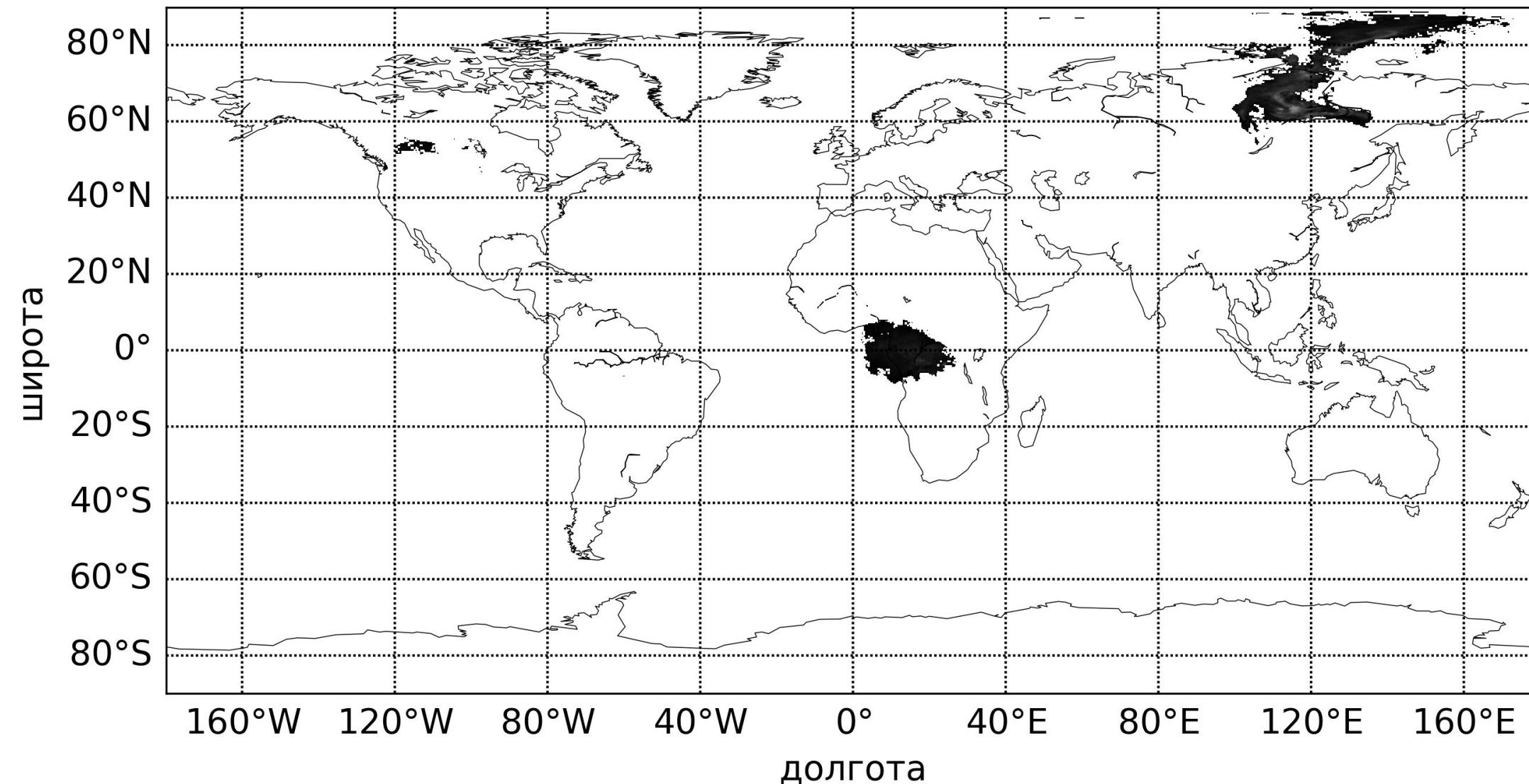
Большинство пикселей содержит фоновые значения в узком диапазоне, при этом правая часть гистограммы также содержит важные данные об аномалиях, но занимают незначительное количество пикселей



Таким образом возникает задача максимально использовать целевой диапазон 0-255, включив в него левую значимую часть гистограммы, но не потерять при масштабировании значимую, но разреженную правую часть.

Компрессия данных

Ранние реализации использовали фильтрацию с обрезанием значений выше порога среднее+3 стандартных отклонения в предположении что значения выше являются ошибочными выбросами. Однако более подробный анализ показал что более высокие значения представляют собой реальные данные, расположены компактно в областях интереса и значительно влияют на оценку потока в этих областях.



Значения, превышающие $mean+3*std$ сигнала (на примере 2021-08-01)

Компрессия данных

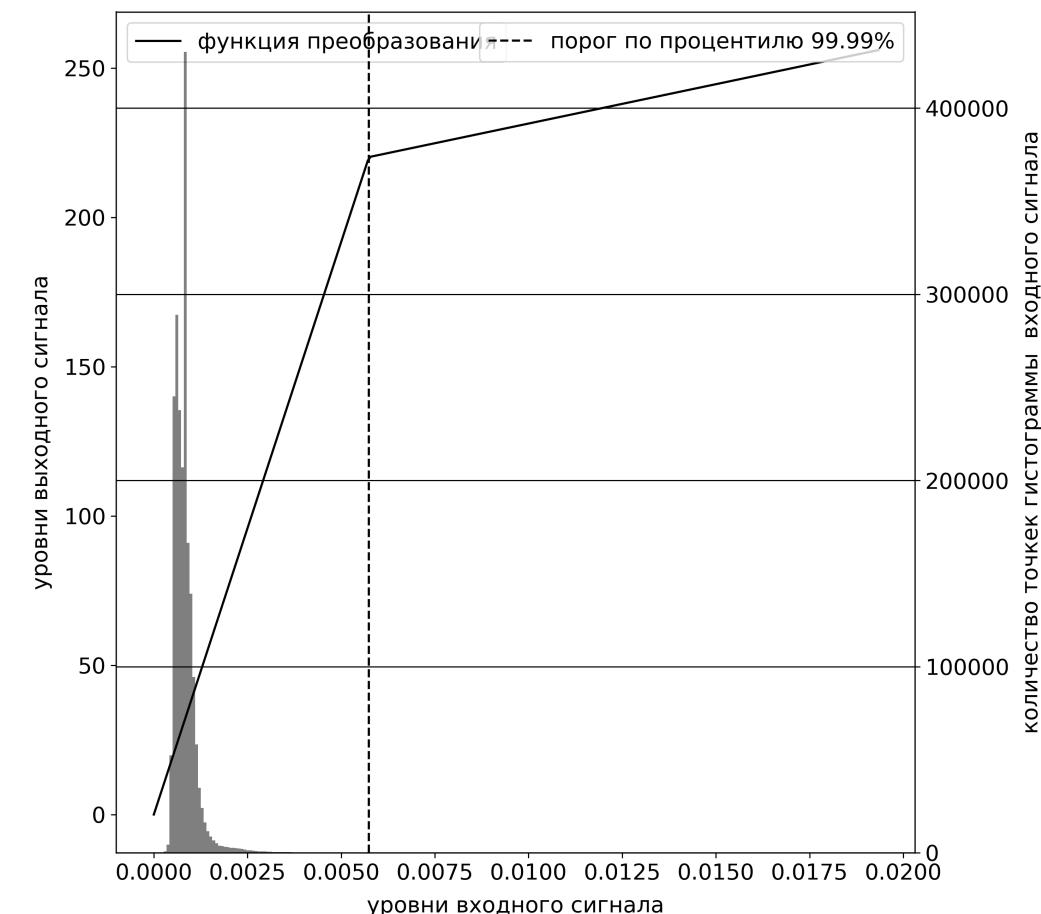
Важно отметить что правая часть гистограммы сильно разрежена и ряд уровней квантования просто не содержит значимых данных. Это позволяет организовать учёт высоких значений и одновременно распределить уровни фоновых значений при помощи компрессии сигнала с кусочно-линейной характеристикой.

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

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

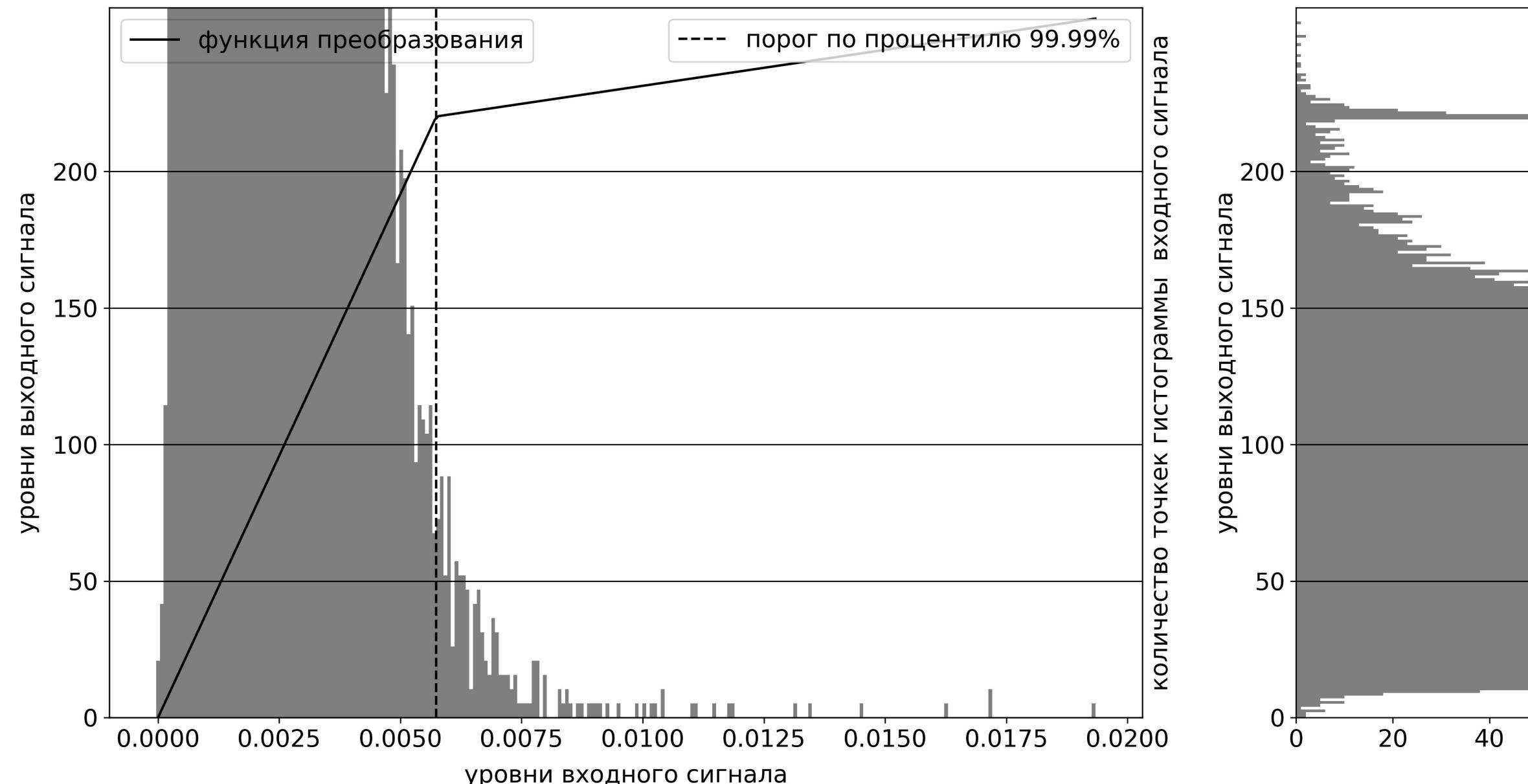
где: S — исходный сигнал, $p_1 = Q_\alpha(S)$ — α -й процентиль сигнала, α — выбранный уровень процентиля. $s_{\max}(S)$ — максимальное значение сигнала, T — пороговое значение.

В качестве порога для компрессии выбран процентиль по уровню $\alpha=99.99\%$ и масштабирование значений до этого порога производится в диапазон от 0 до $T=86\%$ (0-219 в уровнях выходного сигнала после масштабирования). В оставшийся диапазон до 100% (220..255) масштабируются все значения выше этого процентиля до максимального включительно. Таким образом исключается возможность «зашкала» при масштабировании.



Компрессия данных

Такое преобразование может быть наглядно представлено переходной характеристикой, представленной на фоне гистограммы входного сигнала. На рисунке в увеличенном масштабе показано как в результате преобразуется гистограмма выходного сигнала: нижняя часть растягивается на больший диапазон уровней, верхняя сжимается, сохраняя различие уровней квантования.



Выводы

1. Усовершенствование процедуры пересчета на регулярную сетку

- Внедрен метод пересчета данных на равномерную сетку 0.25×0.25 градусов с использованием усреднения всех значимых точек исходных данных в окрестности каждого нового узла. Это позволяет эффективно сглаживать ошибочные выбросы и более полно использовать информацию в ячейках, содержащих лакуны.

2. Разработан многомасштабный алгоритм заполнения лакун

- Применено комплексное заполнение лакун, сочетающее временное снижение разрешения данных, заполнение малых лакун с помощью алгоритма *inpaint* вблизи границ реальных данных, а также заполнение обширных областей медианным значением с гауссовым сглаживанием. Данный подход минимизирует возникновение ложных контрастов на границах данных и артефактов внутри обширных лакун, что снижает количество ошибочных выбросов при оценке оптического потока.

3. Внедрение адаптивной компрессии динамического диапазона

- Реализовано нелинейное преобразование данных в 8-битный формат с использованием кусочно-линейной характеристики сжатия. Преобразование обеспечивает оптимальное распределение уровней квантования: растягивает основной фоновый диапазон данных и сохраняет информативные аномальные значения, что повышает точность расчета потоков в ключевых областях.