



Оценка высоты нижней границы облачности методом нейросетевого сопоставления признаков на основе стереосъёмки

Е.А. Белкова¹, М.А. Борисов², М.А. Криницкий^{1,2}

¹ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

² МФТИ (НИУ)

DLCP-2026

Москва

6 – 8 июля

Актуальность

- 1 Высота нижней границы облачности (ВНГО) - ключевой метеорологический параметр, характеризующий глубину пограничного слоя и необходимый для авиационной и морской безопасности.
- 2 Инструментальные методы (лидары, радиозондирование) требуют дорогостоящего оборудования и стационарной платформы.
- 3 Визуальная оценка облачности характеризуется высокой субъективной неопределённостью.
- 4 Оптические методы по синхронным снимкам потенциально пригодны для нестабильных платформ (суда, буи) и не требуют специализированного оборудования.

Аппаратура [1/2]

Прибор: SAIL Cloud v.2 (2 камеры)

Место: Звенигородская НС

Базис: 45 м

Разрешение: 1920 × 1920 пкс, JPEG

Интервал записи: 10 секунд

Период: 08.05 – 08.06.2025

Поворот кам.2: ~90° относительно кам.1

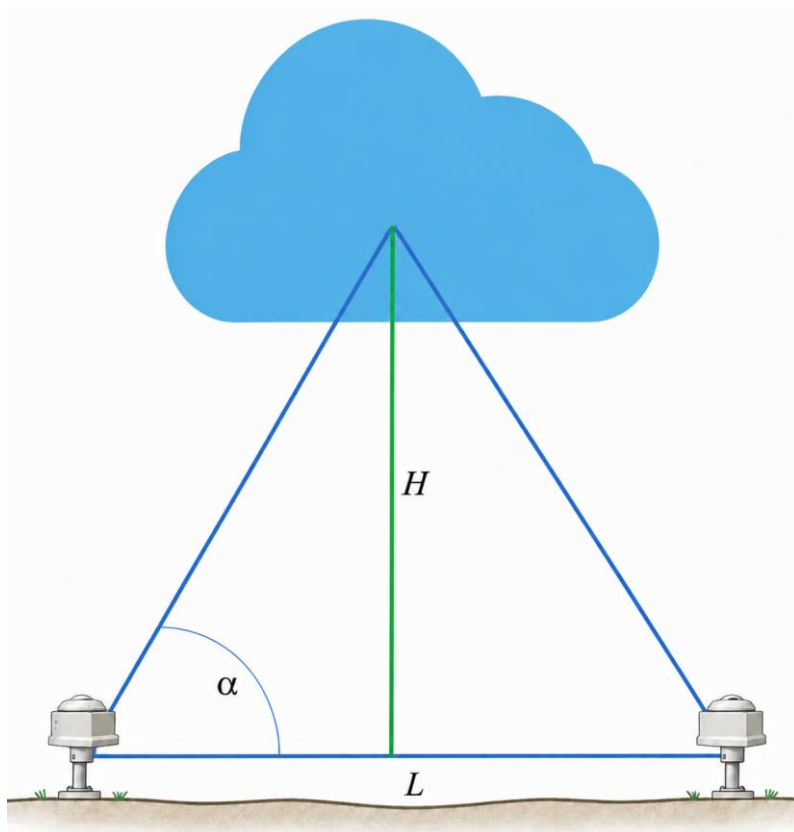


Аппаратура [2/2]

Прибор:	Радиометрическая метеорологическая система РМС-2
Место:	Звенигородская НС
Раб. частоты:	20.7 / 31.4 ГГц
Измерения:	интегральное водосодержание, водозапас облаков, радиояркость, температуру
Интервал записи:	15 секунд
Период:	08.05 – 08.06.2025



Принцип метода - стереоскопический параллакс



Расчётная формула:

$$H = 1920 \cdot L / (S \cdot \pi)$$

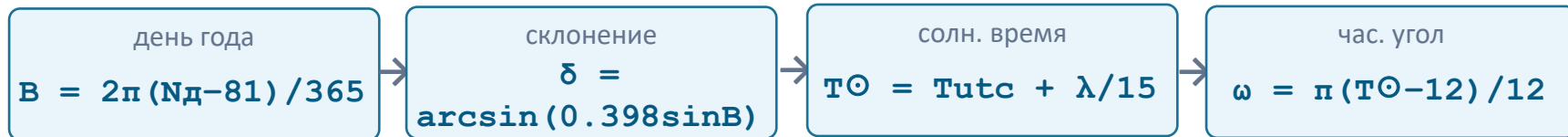
- H - высота облака (м)
- $L = 45$ м - базис
- S - параллакс (пикселей)
- 1920 - размер снимка (fisheye 180°)

Алгоритм обработки данных



Отбор пар: фильтрация по высоте Солнца

Приближение Спенсера - последовательность вычисления:



Высота Солнца над горизонтом:

$$\alpha = \arcsin(\sin\varphi \cdot \sin\delta + \cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega)$$

$\varphi = 55.75^\circ\text{N}$ (широта станции) · $\lambda = 37.62^\circ\text{E}$ (долгота станции)

Почему отбор по $\alpha \geq 40^\circ$?

- Ниже - фиксируются контрастные тени, и SuperGlue матчит наземные объекты, а не облака.
- Больше - Солнце попадает внутрь маски ($r < 710$ пкс) - детектор центра работает надёжно.

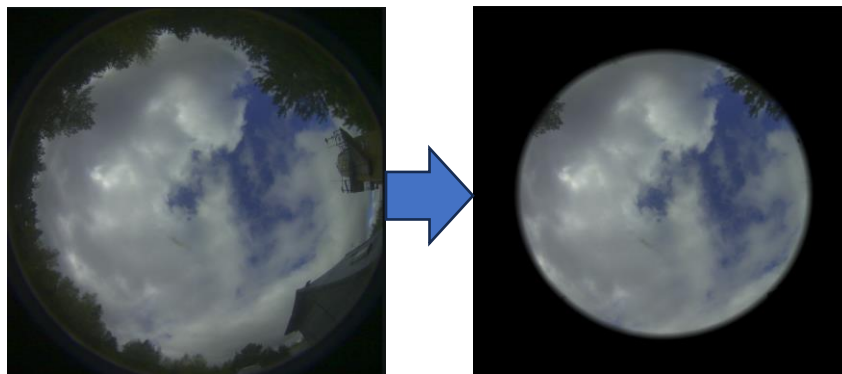
Рабочее окно (UTC)

Май: 07:00 – 13:30

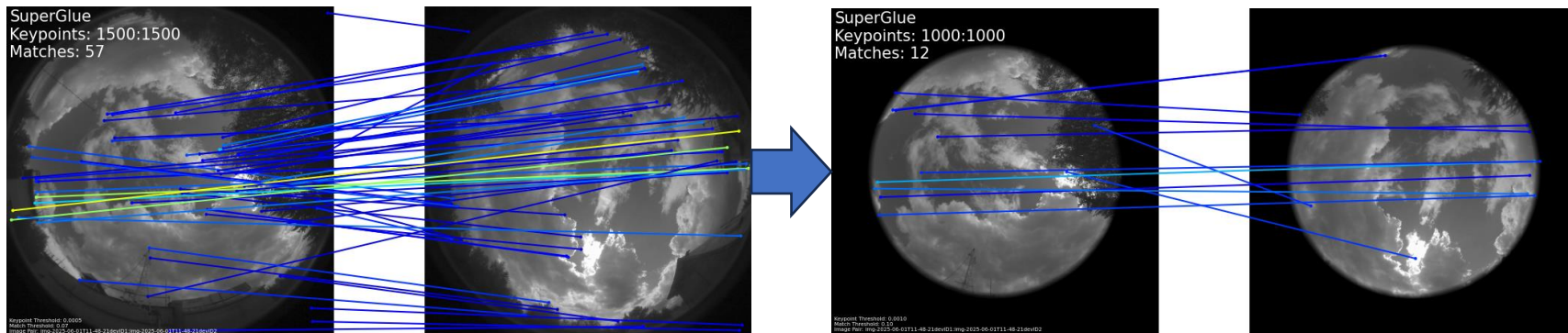
Июнь: 06:10 – 13:50

1900 – 3600 пар в сутки

Круговая маска



Снимки до/после маскировки



Результаты сопоставления до/после маскировки

Геометрическая калибровка камер

Принцип: Солнце на бесконечности, потому параллакс отсутствует, а смещение проекций отражает только взаимную геометрию камер

- 1 Детектор центра Солнца**
на снимках кам.1 и кам.2 (порог 250/255, моменты)
- 2 Накопление точек**
21 343 пары позиций Солнца за 14 дней
- 3 Модель преобразования**
вращение θ + смещение (a, b) вокруг центра (960, 960)
- 4 Итеративный RANSAC**
удаление точек с остатком > 30 пкс, 4 итерации

$$\begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & a \\ \sin \alpha & \cos \alpha & b \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Итоговая матрица M

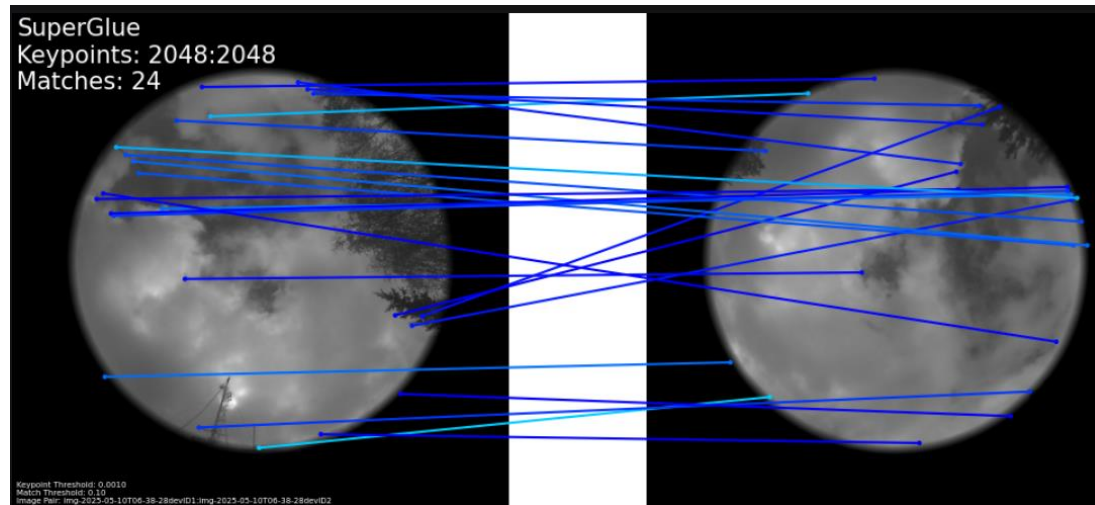
0.0235	-0.9997	1933.8
0.9997	0.0235	-19.2
0	0	1

$\theta = 88.65^\circ$

17 616 / 21 343 точек (82.5%)

медиана остатка 7.1 пкс

Сопоставление ключевых точек (SuperGlue)



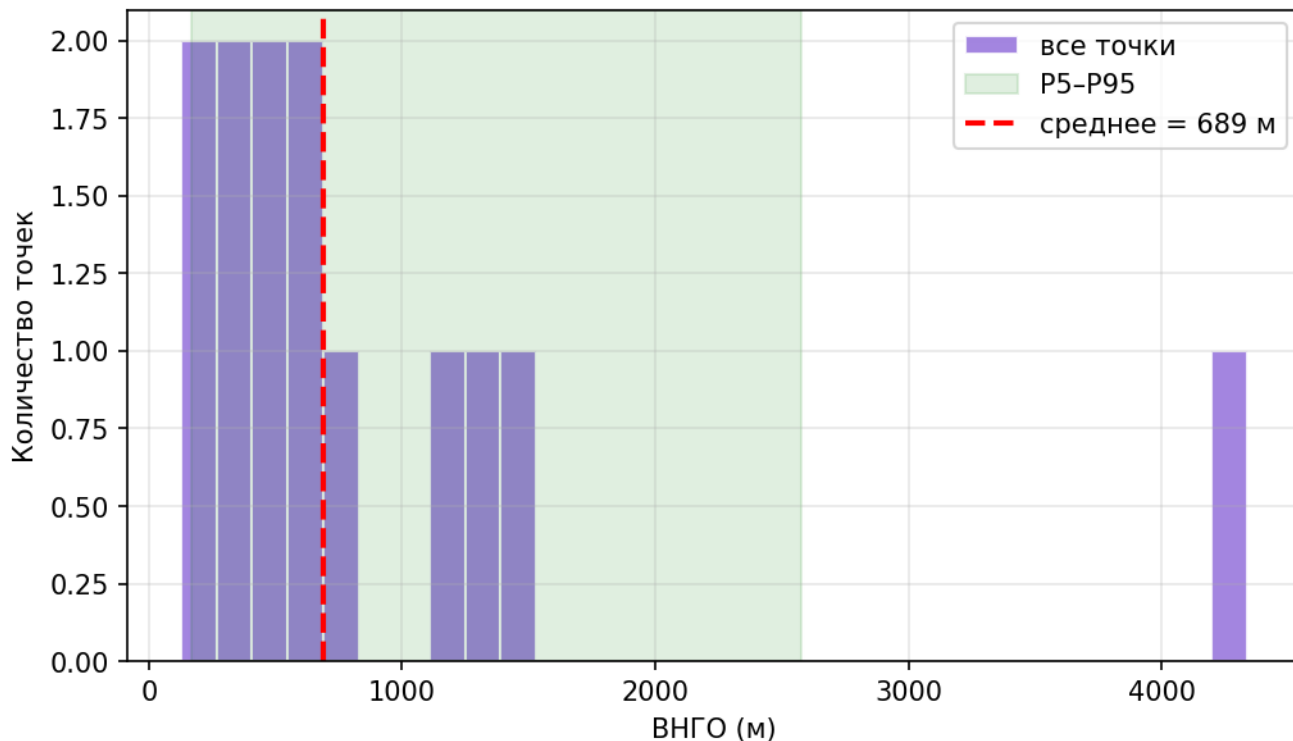
*Пара снимков с линиями совпадений после
SuperGlue
(2025-05-10, 06-42-58)*

Параметры SuperGlue

Beca	outdoor
max_keypoints	2048
nms_radius	10 пкс
keypoint_threshold	0.001
match_threshold	0.1
resize	-1 (нет)

Результат валидации одного дня (08.05.2025)

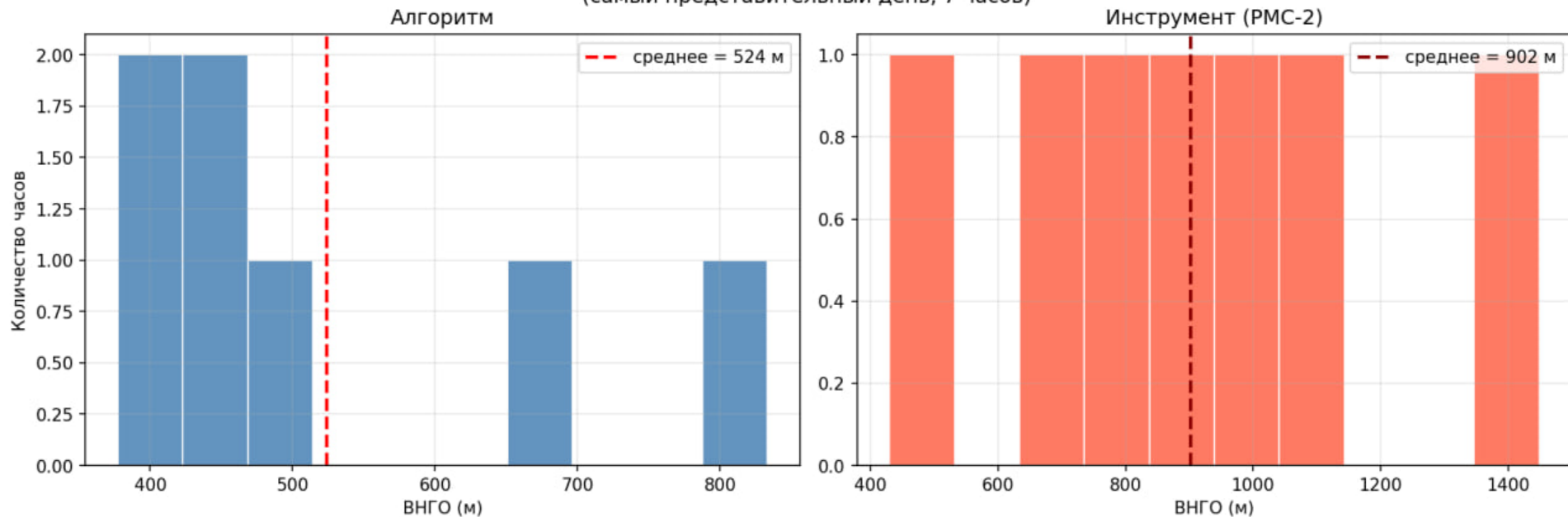
Уровень 0 — одна пара снимков
2025-05-08 06:42:34 UTC (13 точек)



- Один момент времени - одна пара снимков двух камер.
- 13 совпадений SuperGlue прошли фильтры качества.
- Каждая точка даёт свою оценку H по формуле параллакса.
- Зелёная зона - P5-P95, крайние 5% с каждой стороны отброшены как аномалии.

Результат валидации представительного дня (10.05.2025)

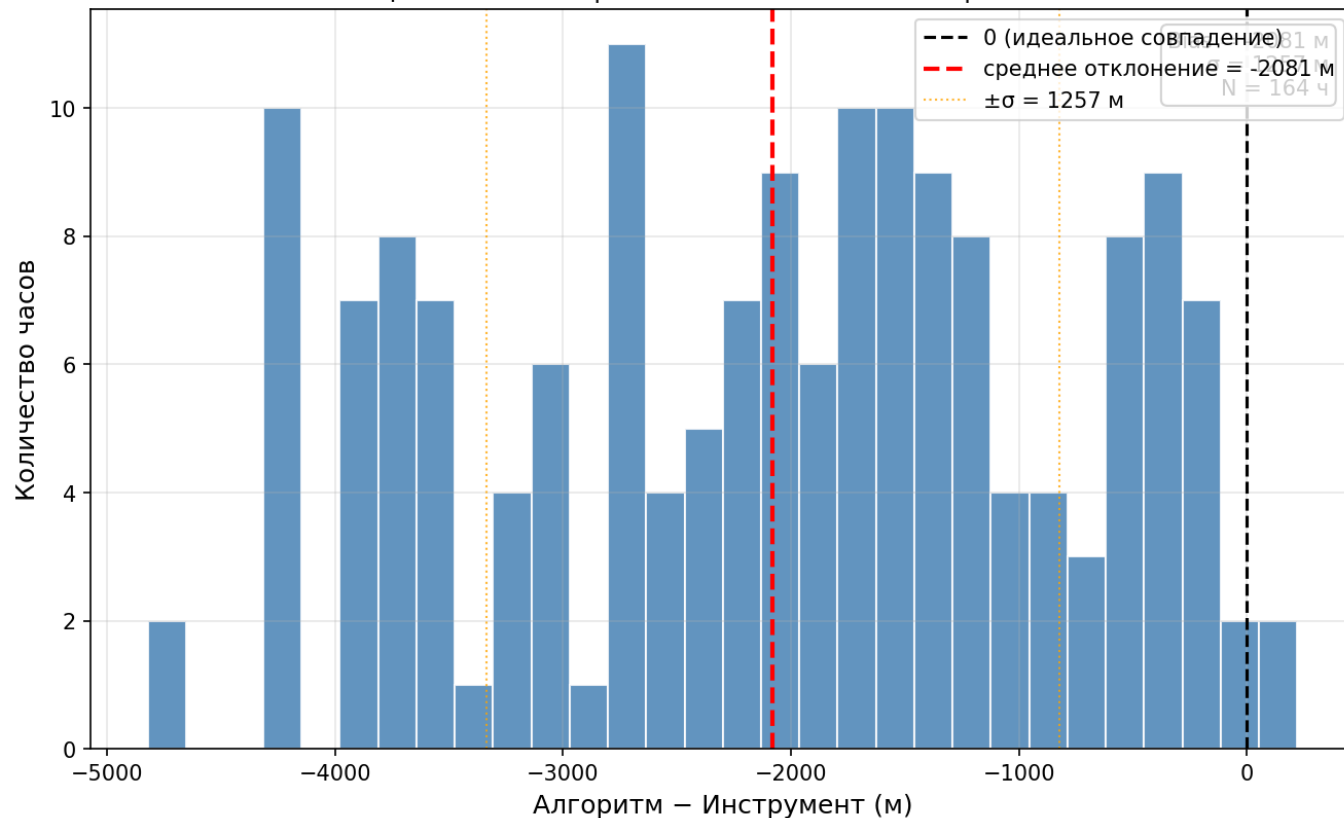
Сравнение часовых средних ВНГО за 2025-05-10
(самый представительный день, 7 часов)



- Алгоритм и РМС-2 показывают одинаковый порядок величины (524 м vs 902 м).
- Инструмент охватывает диапазон 400–1400 м (реальная изменчивость облачности за день).
- Алгоритм сжат в 350–850 м и не улавливает высоких облачных слоёв второй половины дня.

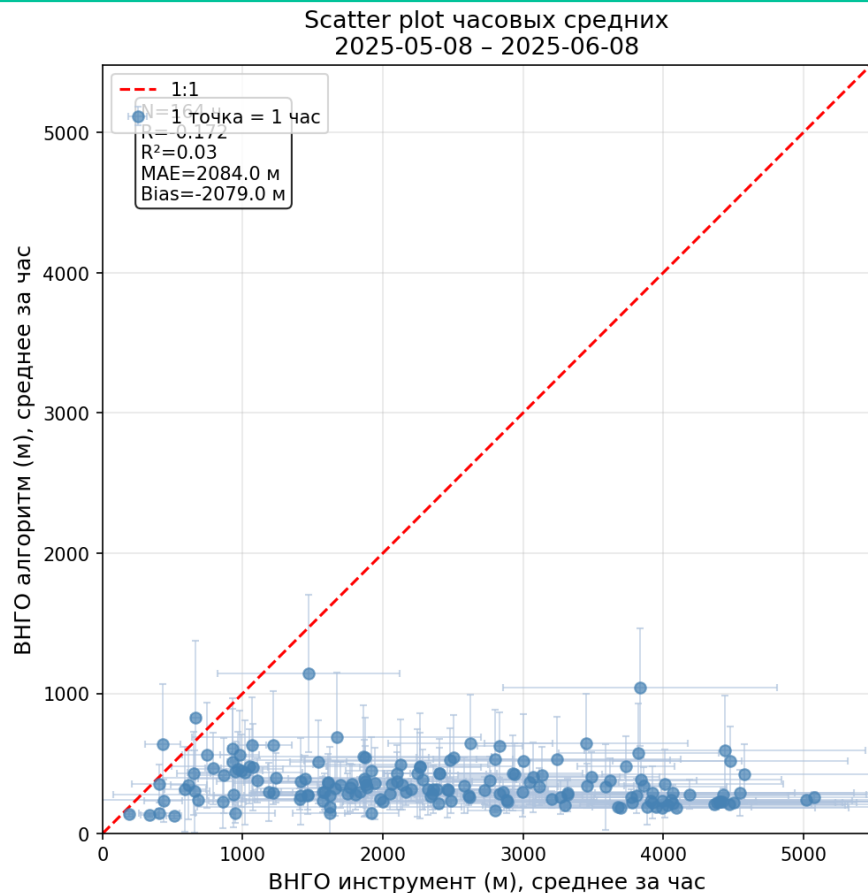
Результаты валидации за месяц (08.05 – 08.06.2025) [1/2]

Гистограмма отклонений часовых средних ВНГО
алгоритм – РМС-2 | 2025-05-08 – 2025-06-08 | N = 164 ч



- Среднее отклонение - 2081 м.
- Распределение широкое ($\sigma = 1257$ м) - ошибка нестабильна и сильно варьирует от часа к часу.
- SuperGlue стабильно сопоставляет объекты, параллакс которых соответствует ложно заниженной высоте.

Результаты валидации за месяц (08.05 – 08.06.2025) [2/2]



Метрики (часовая агрегация)

N часов

164

R

+0.17

R²

0.03

MAE

2084 м

Bias

-2079 м

Итоги

- Реализован полный вычислительный конвейер оценки ВНГО на 30 днях - от архива до валидации.
- Точность определения ВНГО (часовая агрегация):
 - $N = 164$ часа,
 - $R = +0.17$,
 - $R^2 = 0.03$,
 - $MAE = 2084$ м,
 - $Bias = -2079$ м.
- ! Стандартный SuperGlue недостаточен для облачных изображений.

Перспективы: дообучение SuperGlue на облачных снимках · вариативная предобработка снимков · другие модели

Благодарности

Работа выполнена в рамках стажировок программы «Плавучий университет» по направлению «Физика атмосферы и океана».

Расчёты выполнены на сервере TESLA
Лаборатории взаимодействия океана и атмосферы ИО РАН.

Исследование выполнено в рамках Соглашения № 075-03-2026-305
Московского физико-технического института.

Спасибо за внимание!

Е.А. Белкова · ekatbelk@gmail.com

Альтернативные методы сопоставления для облачных изображений

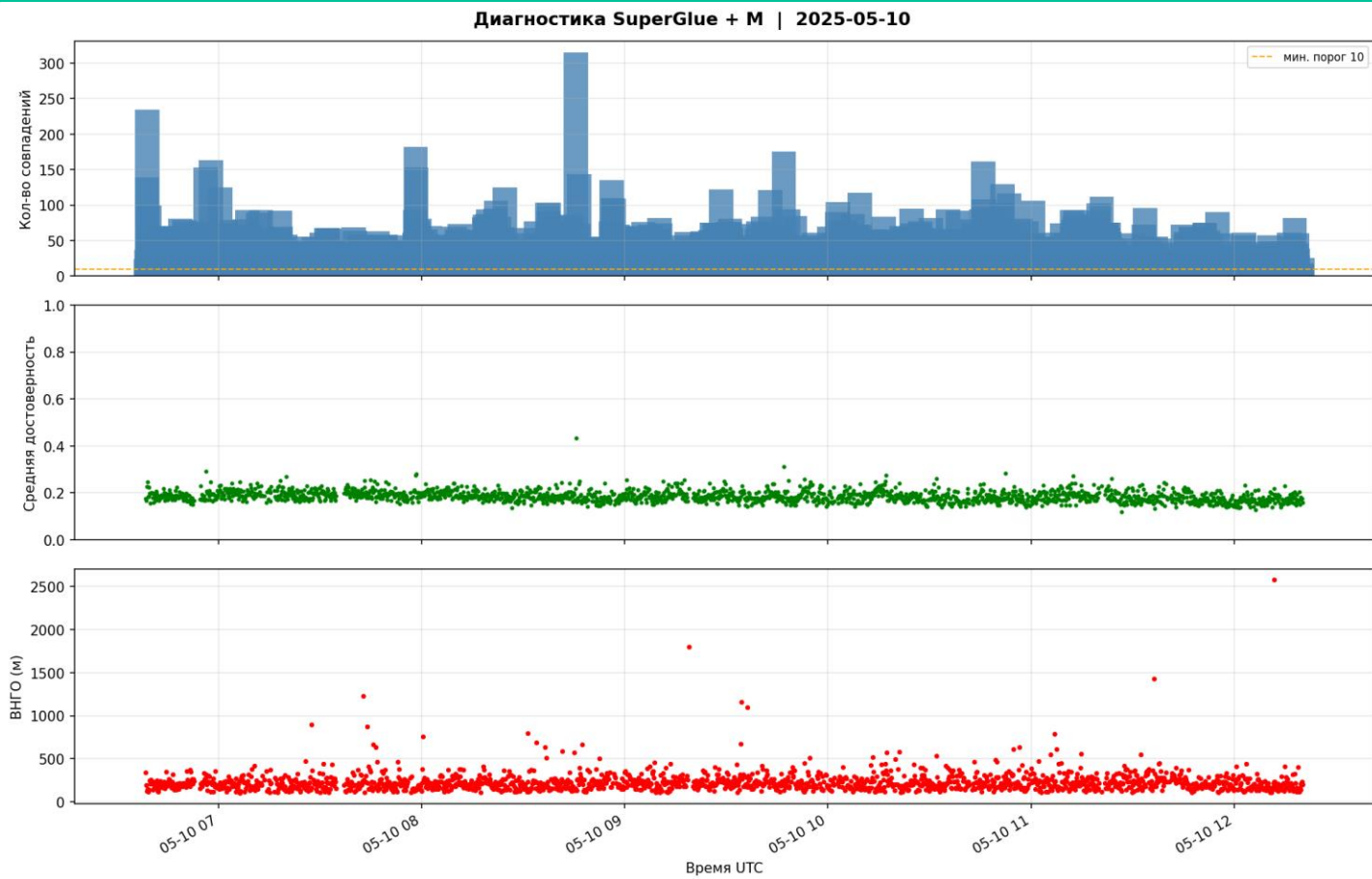
Метод	Тип	Без детектора ключевых точек	Для слабой текстуры	Скорость	Сложность внедрения	Приоритет
LoFTR (CVPR 2021)	Полуплотный	✓	✓✓	★★★	Низкая	★★★★★
RoMa (CVPR 2024)	Плотный	✓	✓✓	★★	Низкая	★★★★★
LightGlue + ALIKED	Разреженный	✗	✓	★★★★★	Низкая	★★★★
RAFT-Stereo	Оптич. поток	✓	✓✓	★★★	Высокая	★★★★
AMV (метео)	Кросс-кор.	✓	✓✓	★★★★★	Средняя	★★★★
SuperGlue (дообуч.)	Разреженный	✗	✓✓	★★★	Очень высокая	★★★★★

 Хорошо

 Средне

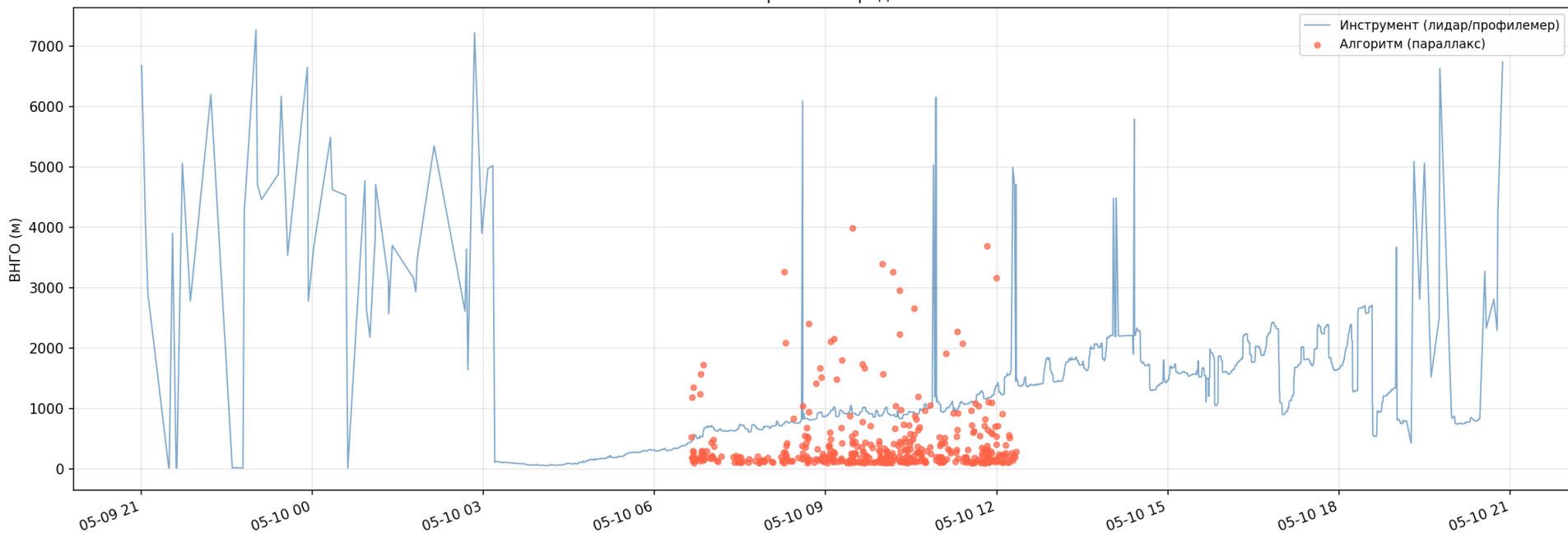
 Ограничено / сложно

Результат валидации одного дня (10.05.2025)



Результат валидации одного дня (10.05.2025)

Сравнение ВНГО алгоритм vs инструмент | 2025-05-10
Временной ряд



Результаты валидации за месяц (08.05 – 08.06.2025)

