

# Возможности калибровки космических гидропостов по данным альtimетрии на примере рек Центральной Азии

Мухамеджанов<sup>1</sup> И.Д., Врублевский<sup>2</sup> М.В., Лупян<sup>2</sup> Е.А., Умирзаков<sup>3</sup> Г.У.

<sup>1</sup> Филиал МГУ М.В. Ломоносова в г. Ташкенте

<sup>2</sup> Институт космических исследований РАН

<sup>3</sup> НИГМИ при Узгидромет (г. Ташкент)

Двадцать третья международная конференция  
"Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса"  
ИКИ РАН, 10 – 14 ноября 2025 г.

# Цели работы

Разработать методику калибровки космических гидропостов (КГП) по данным спутниковых альтиметров для расширения рядов наблюдений за уровнем рек в точках пролета альтиметров:

1. Расположить космические гидропосты на руслах рек около подспутниковых точек альтиметров;
2. Определить метод для автоматической генерации космических гидропостов с наилучшими параметрами;
3. Масштабировать метод на русла рек Амударьи и Сырдарьи;
4. Провести калибровку космических гидропостов по альтиметрическим данным;
5. С использованием метрик определить оптимальные параметры для процедуры калибровки и тестирования полученной откалиброванной модели;

# Актуальность работы

1. Контроль трансграничных рек является комплексной задачей, где объективные и своевременные показатели играют ключевую роль;
2. Дефицит наземных измерений. Данные часто оказываются закрытыми и недоступными для анализа в силу административных особенностей границ;
3. Расширение временных рядов уровня рек через показатели, рассчитанные по спутниковым данным, позволяет в дальнейшем использовать «восстановленные» ряды в гидрологических моделях краткосрочного прогнозирования.

# Пример сети наземных ГП на р. Амударье (2540 км) [[cawater-info.net](http://cawater-info.net)]

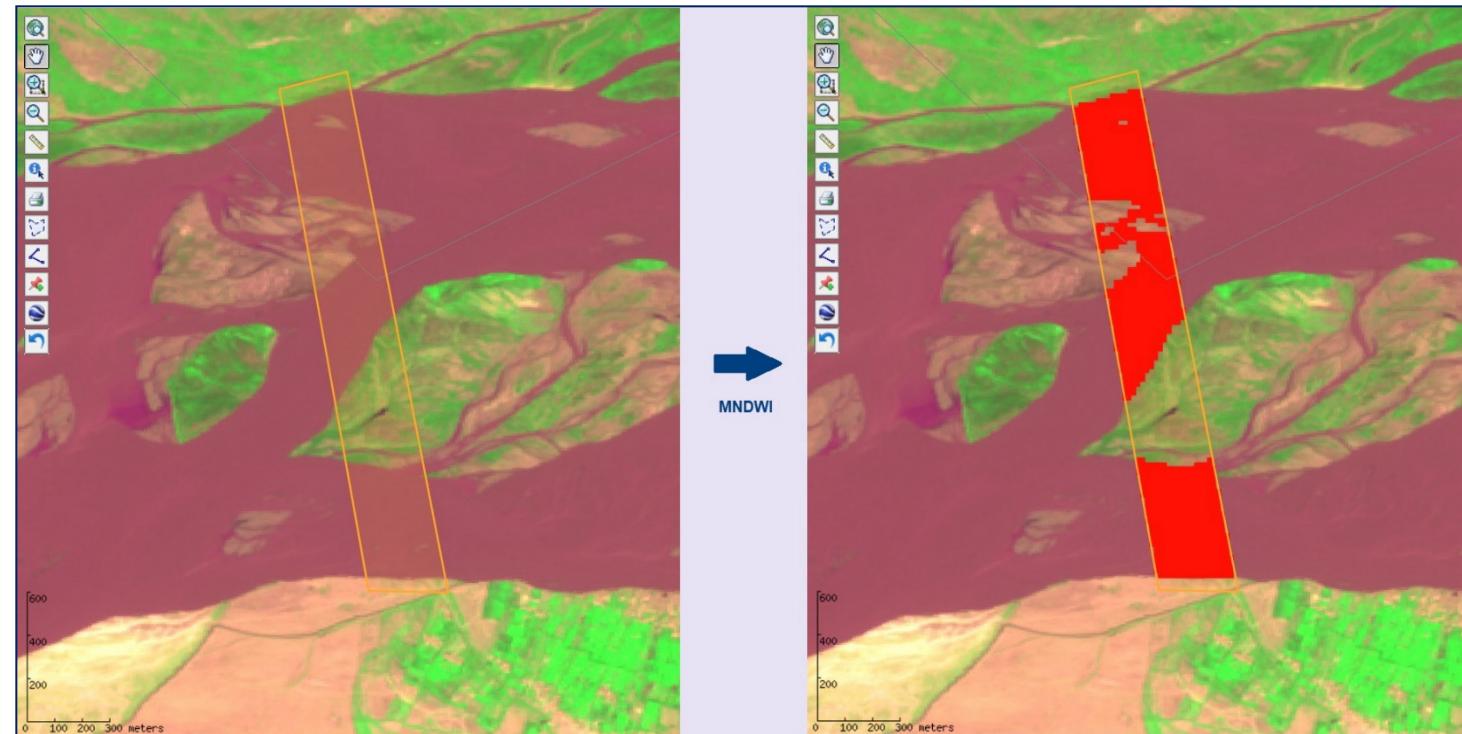
№	Гидропост	Страна ГП	Статус
1	Верхнеамударьинский	Таджикистан	Не работает
2	Терmez	Узбекистан	Работает
3	Келиф		Работает
4	Мукры		Работает
5	Атамурат		Работает
6	Карабекавул	Tуркменистан	Не работает
7	Туркменабат		Работает
8	Ильчик		Не работает
9	Бир-Ата		Работает
10	Лебап		Работает
11	Туямуон		Работает
12	Ташсака		Работает
13	Беруни		Работает
14	Кипчак		Работает
15	Кызкеткен	Узбекистан	Работает
16	Саманбай		Работает
17	Кызылджар		Работает
18	Порлатая		Работает

15 активных  
измерительных  
станций согласно  
данным на 1983 г.

# КГП – структурный элемент при построении сетей для мониторинга



«Космический» гидропост (КГП) - произвольный полигон в базе данных с временными границами для поиска спутниковых сцен в архиве.

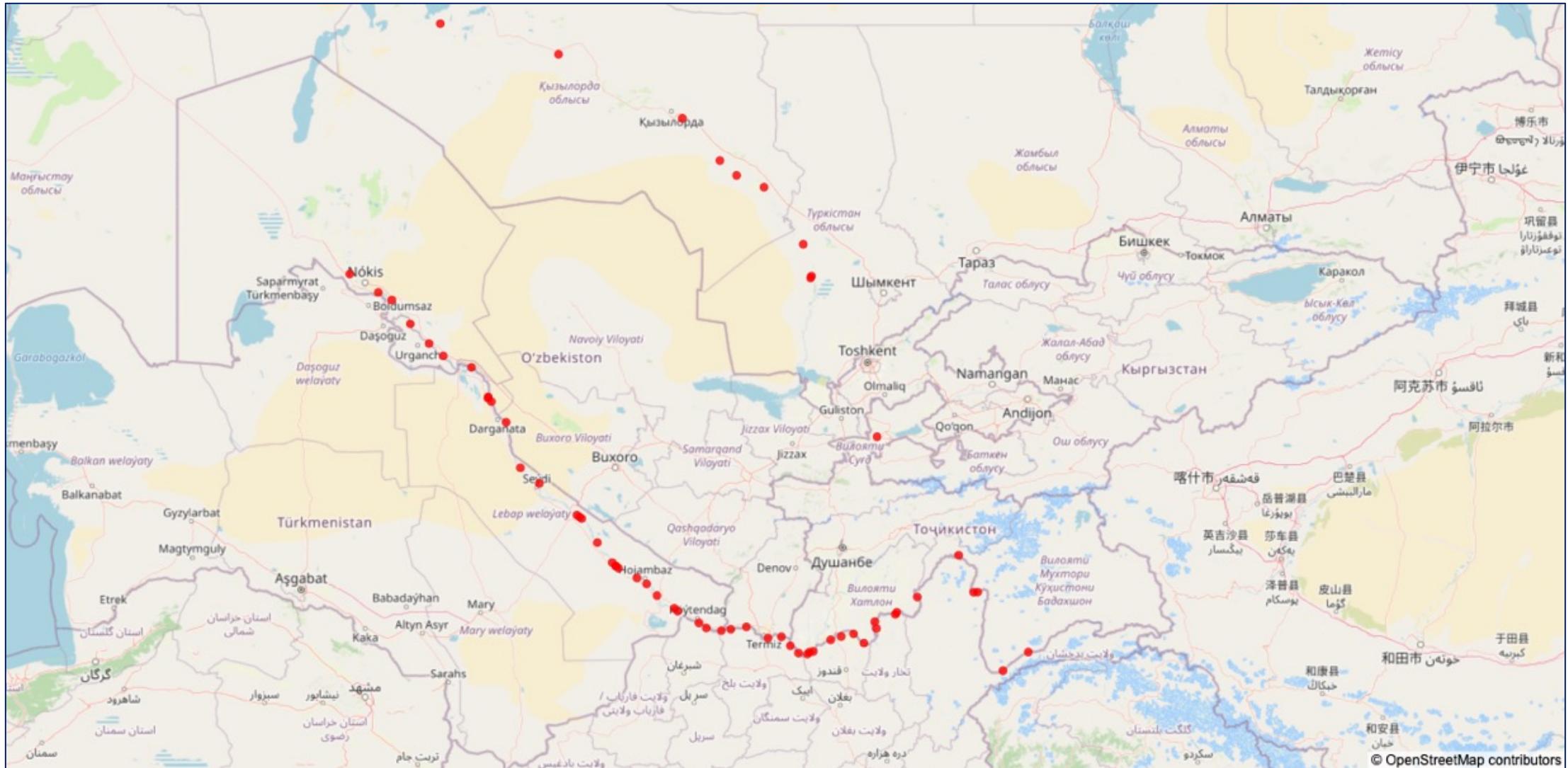


Оперативный расчет площади водного зеркала производится путем вычисления индекса MNDWI. Анализ множества спутниковых сцен из долговременных архивов для заданного периода занимает **несколько минут**

# Преимущества КГП

Наземная станция	Космический гидропост
Имеет ограничения по установке, в том числе территориально	Устанавливается как полигон на карте, количество фактически неограничено
Издержки на техническое обслуживание и непосредственный контроль за работой г/п, а также высокая стоимость оборудования и установки	Данные формируются автоматически по мере появления новых спутниковых сцен, при этом облачные снимки фильтруются
Данные не всегда находятся в открытом доступе	Площадь водного зеркала рассчитана по спутниковым данным оптического диапазона, находящимся в свободном доступе (Landsat-4,5,7,8,9; Sentinel-2A,-2B)
Может быть поврежден в результате ЧС или иными факторами	Виртуальный объект продолжает работу несмотря на погодные условия или ЧС

# Район исследования – часть территории Центральной Азии

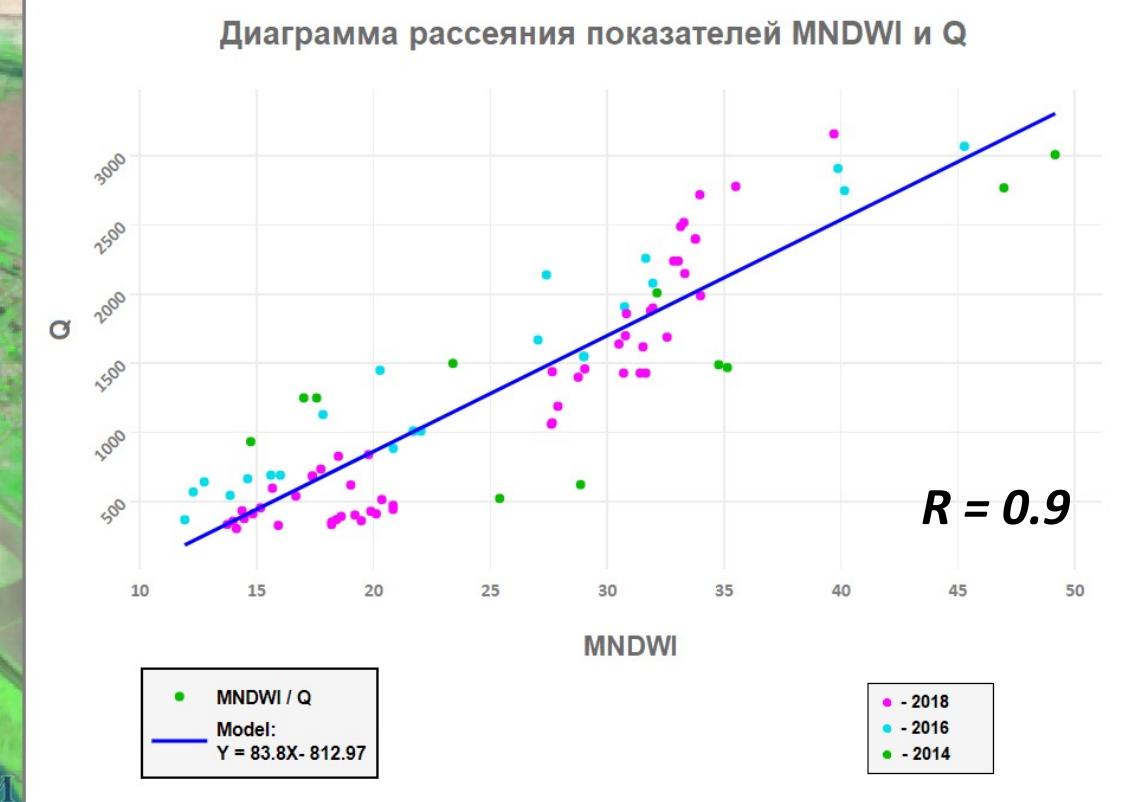


# Необходимость калибровки КГП

- Космические гидропосты – инструмент для восполнения пробелов данных (или замены при их отсутствии) и оценки состояния водных объектов. Оптические спутниковые изображения не всегда способны предоставить исчерпывающую информацию о водном объекте, в частности, о реках (в особенности, крупных).
- Такие параметры, как суточный сток и уровень не всегда находятся в открытом доступе, что затрудняет работу исследователей на местах;
- Поиск зависимости площади водного зеркала от величины суточного стока или уровня ( $Q[S]$  или  $H[S]$ ) помогает с некоторой погрешностью восстанавливать недостающие измерения в течение некоторого периода. Этот процесс в рамках КГП будем называть калибровкой гидропостов.

# Калибровка КГП по наземным данным

Корреляция  $Q$  (суточного стока) и  $S_{MNDWI}$  (площади в/п) - I шаг



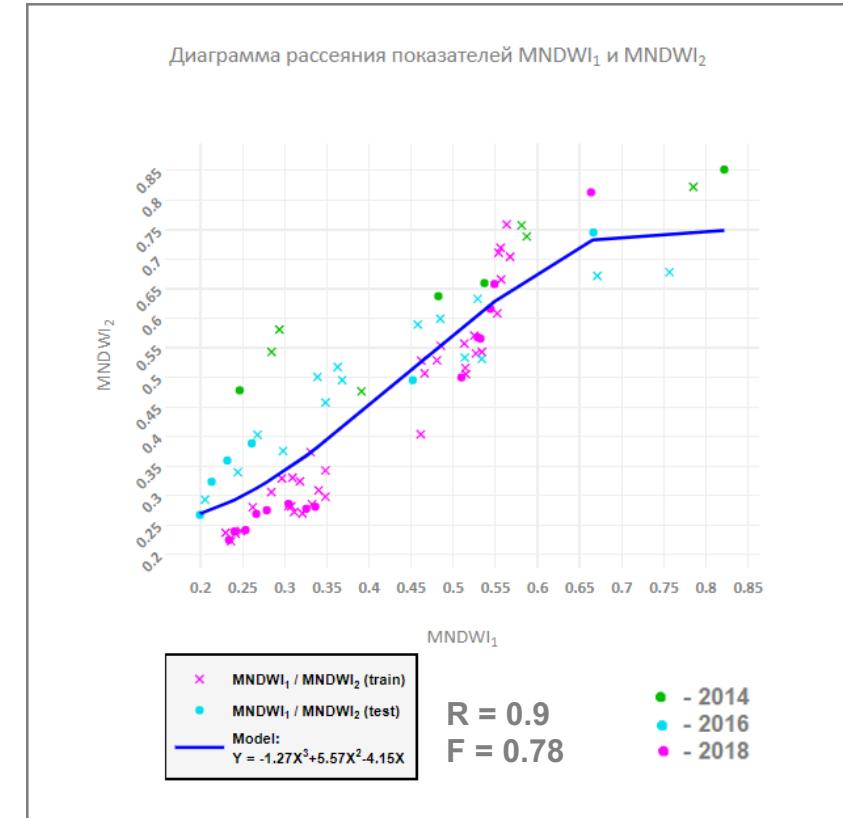
● 2014 • 2016 • 2018

# Калибровка КГП. Шаг N+1.

*В результате продолжения цепи КГП формируется качественно откалиброванная последовательность (сеть КГП)*



*при калибровке производится сохранение ссылки на предыдущий КГП и коэффициентов модели при переходе к каждому следующему объекту*



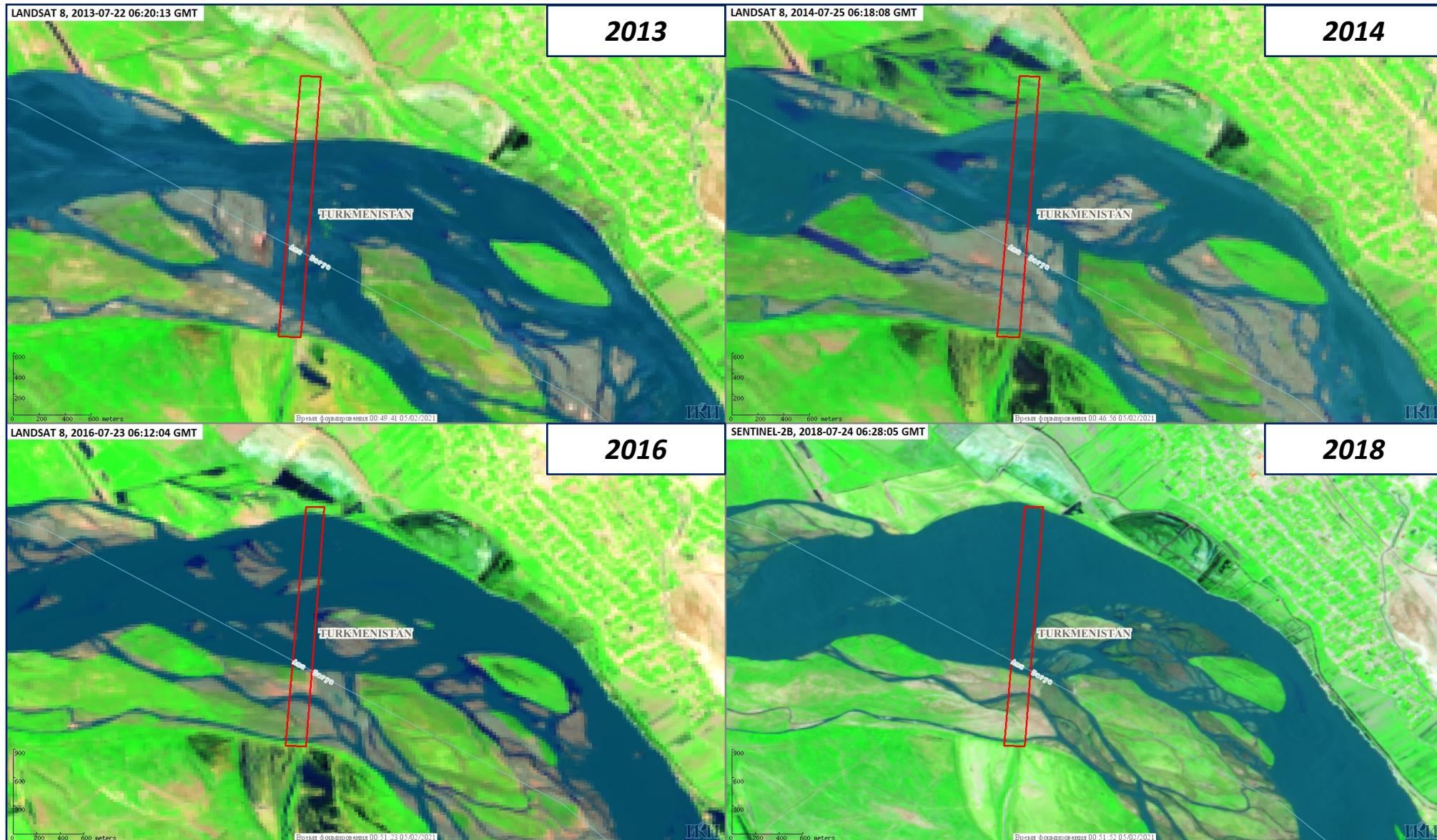
*метрика качества работы сети – результат теста Фишера, отношение дисперсий рядов MNDWI двух КГП*

# **Сложность выбора полигонов**

*Установка КГП по одной спутниковой сцене повышает вероятность того, что на снимках в период, следующий за калибровкой, данный участок русла был пересохшим или, напротив, полноводным. В результате изменения морфологии русла могут появиться заливные участки или шумы, снижающие точность работы КГП*

**Автоматизированная генерация КГП по сезонному наличию воды позволит минимизировать рутинный труд оператора и найти наиболее динамические участки русла**

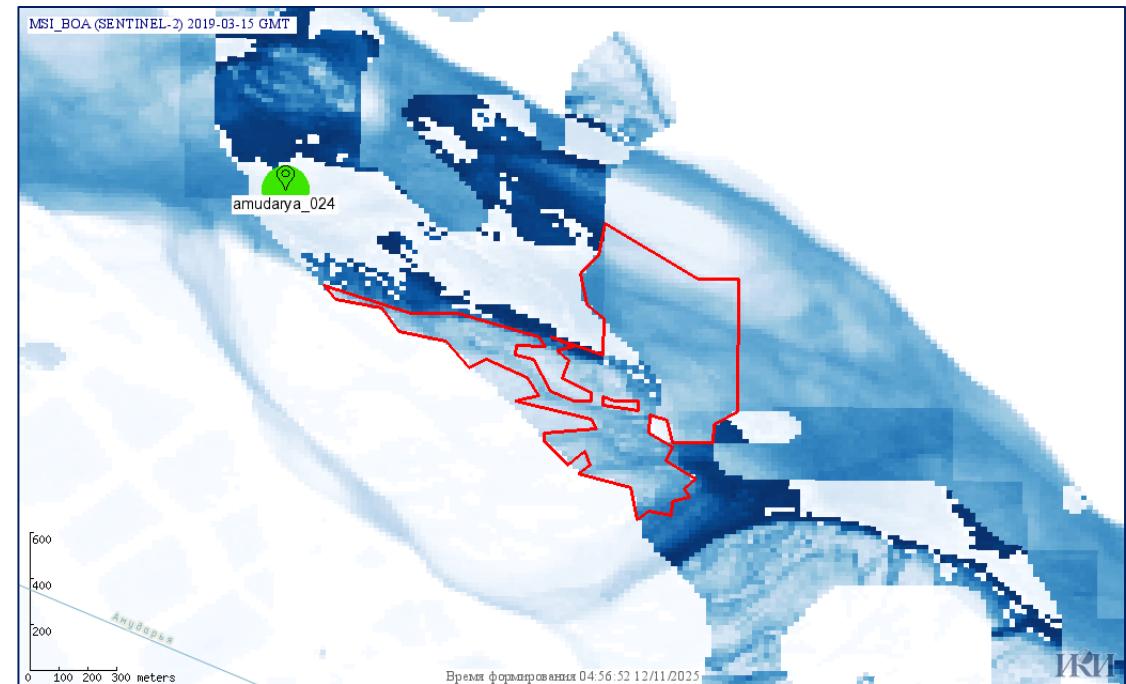
# Пример естественного смещения русла Амударьи



# Схема автогенерации КГП

С целью масштабной выделения максимальной динамики был проведен ряд экспериментов с вероятностными картами по пятилетним композитам с процентами водной поверхности на такой карте для периода март-октябрь 2019–2023 гг.

- построение маски воды по указанным диапазонам по продукту «процент измерений воды» специального продукта-композита Sentinel-2 (карта водных объектов за отдельный период);
- выбор наибольшего по площади полигона;
- удаление внутренних областей (размера до 2x2 км) в пределах границ полигона;
- упрощение границ полигона (уменьшение кол-ва вершин).



КГП, построенный по композиту

# Схема автогенерации КГП [пример результатов]

amudarya\_001



amudarya\_003



amudarya\_004



amudarya\_005



amudarya\_008



amudarya\_010



amudarya\_011



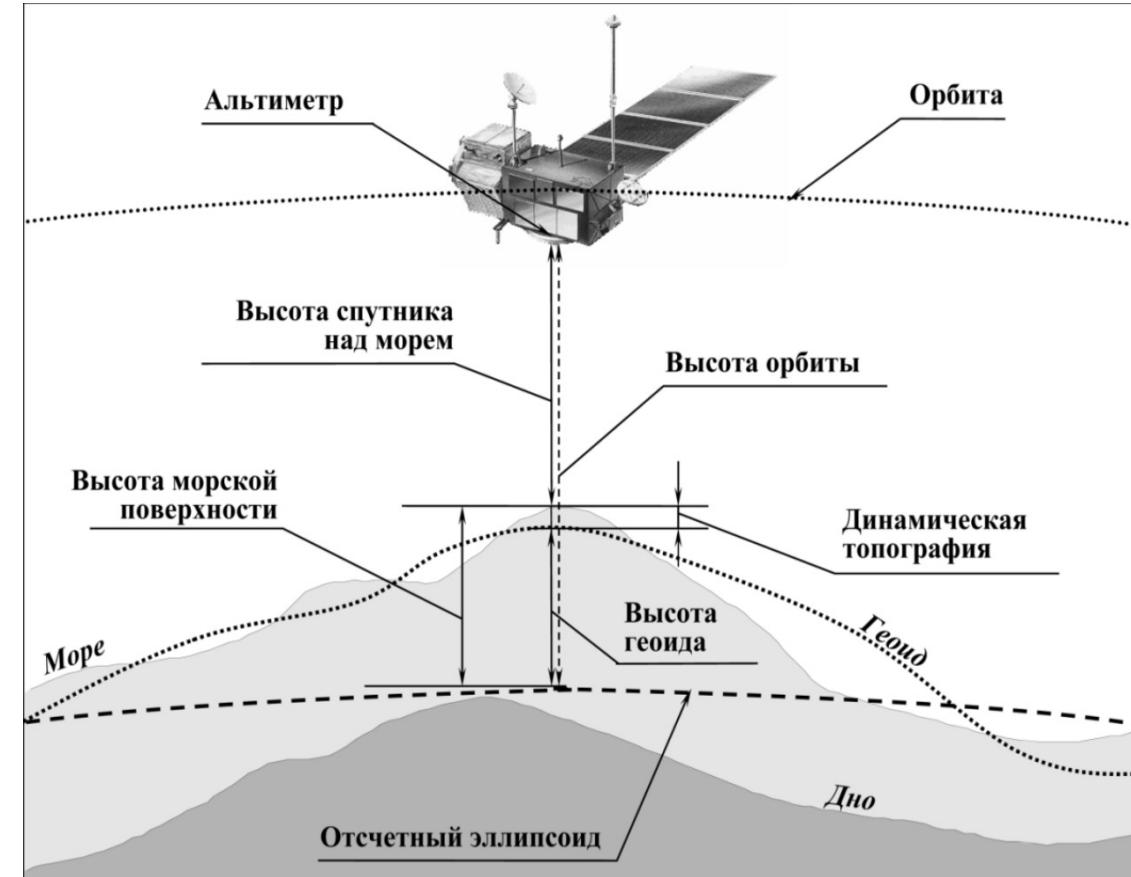
amudarya\_012



# Калибровка КГП при помощи альтиметрии

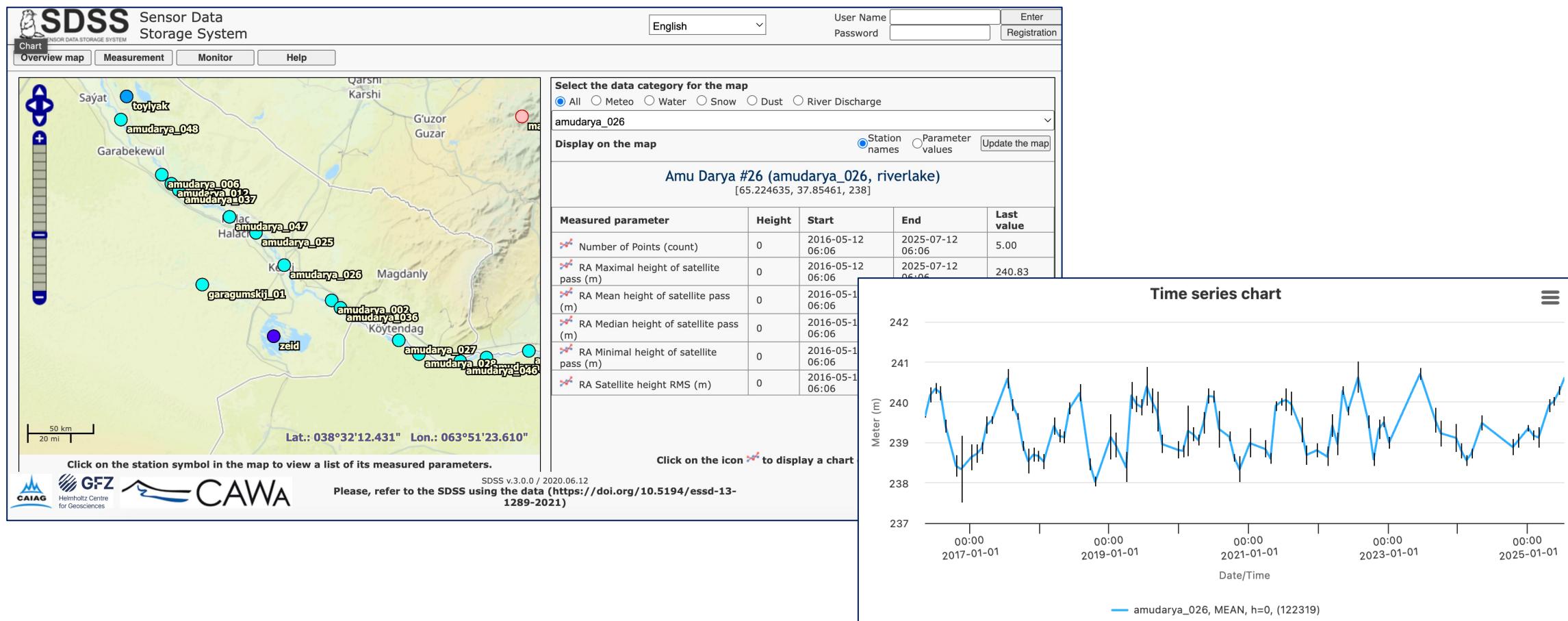
Выбрать открытый источник альtimетрических измерений, восстановив его данные каждого из них по оптическим сенсорам:

1. Рассчитать  $R[H, S]$ ;
2. Определить  $MAE(H_{alt}, H_{alt}[S])$ ;
3. Определить подходящую длительность калибровки и тестирования для получения устойчивой модели выражения  $H(S)$ .



# Источник альtimетрии

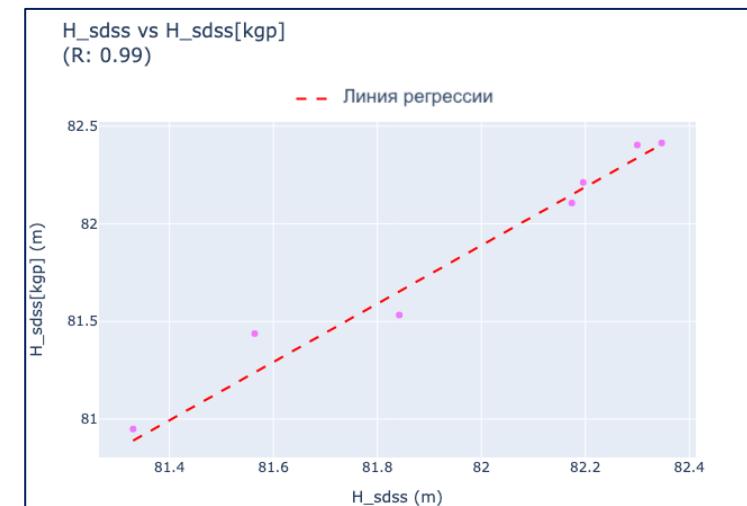
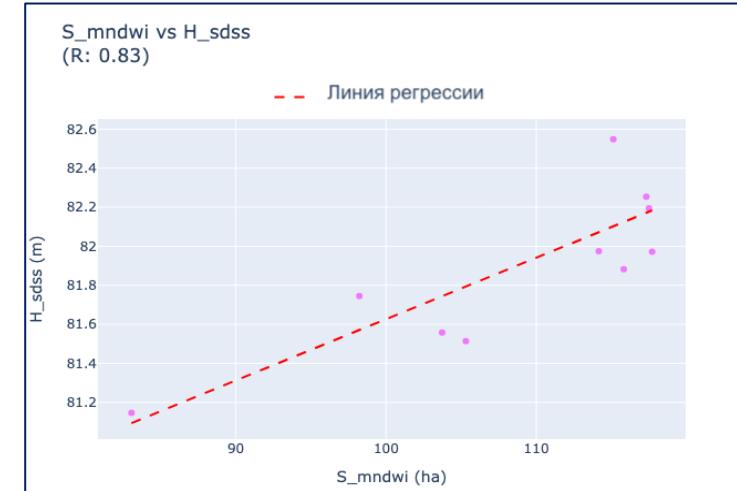
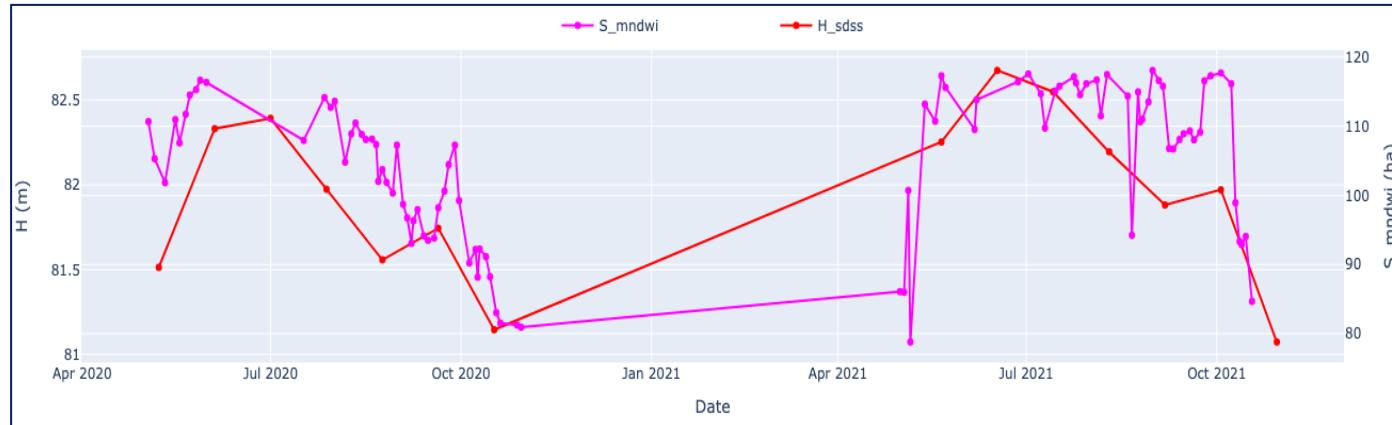
Система хранения сенсорных данных SDSS, временные ряды по альтиметрии формируются со спутников **Sentinel-3A**, **Sentinel-3B**, **Sentinel-6MF**, **Topex/Poseidon**, **Jason-1**, **-2**, **-3** (<https://sdss.caiag.kg>).



# Калибровка КГП

Подбор полинома, расчет  $R_{pearson}(H, S)$ ,  $MAE_{SDSS}$

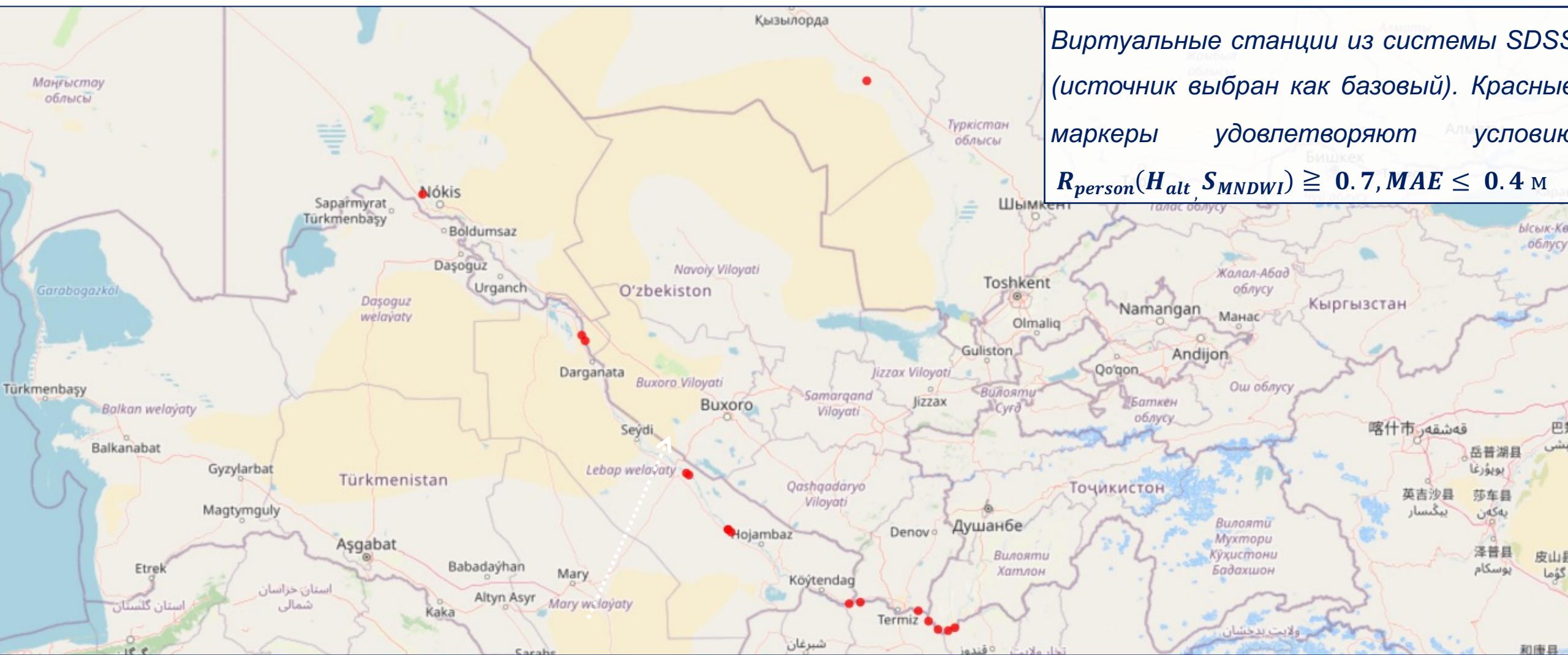
Данные выбраны за период май-сентябрь, калибровка на периоде 2020-2021, тестирование - 2022 г.



Квазиодновременные наблюдения для  $S$  и  $H$ :  $\pm 3$  дня

$$H[S] = aS + b$$

# Результаты калибровки



Виртуальные станции из системы SDSS  
(источник выбран как базовый). Красные  
маркеры удовлетворяют условиям  
 $R_{person}(H_{alt}, S_{MNDWI}) \geq 0.7, MAE \leq 0.4 \text{ м}$

«Неподходящие» станции около русла Сырдарьи также были исключены ввиду особенностей  
морфологии русла (невозможность сформировать динамический ряд площади ВЗ)

# Результаты калибровки

Диапазон измерений воды, %	Тип сезонного композита Sentinel-2 (лет)	Период калибровки (лет)	Период тестирования (лет)	Лаг высоты к площади (дней)	Степень полинома регрессии	R_cp (S, H)	Ср. ошибка, м (MAE)	% подходящих станций ( $R > 0,7$ , MAE $< 0,4$ )
10-40	5 (март-октябрь)	5	1	3	1	0,76	0,31	6
				3	2	0,81	0,36	2
				3	3	0,8	0,38	3
	5 (март-октябрь)	5	2	3	1	0,77	0,32	3
				3	2	0,74	0,29	1
				3	3	0,76	0,34	2
	5 (март-октябрь)	1	1	3	1	0,85	0,26	16
				3	2	0,87	0,27	10
				3	3	0,86	0,25	9
	5 (март-октябрь)	1	2	3	1	0,82	0,29	9
				3	2	0,89	0,28	5
				3	3	0,85	0,27	6
	5 (март-октябрь)	2	1	3	1	0,83	0,3	12
				3	2	0,8	0,3	10
				3	3	0,83	0,28	7
	5 (март-октябрь)	2	2	3	1	0,85	0,29	15
				3	2	0,8	0,3	15
				3	3	0,85	0,27	11

- Сервис семейства Созвездие-Вега, предоставляет доступ к оперативным данным ДЗЗ;
- Система, позволяющая вести наблюдения за объектами и оценивать качество этих наблюдений (поддерживает работу с КГП и анализ временных рядов);
- Картографический интерфейс ориентирован на среднеазиатский регион;
- Функционирует с использованием ресурсов ЦКП «ИКИ-Мониторинг».

# Интерфейс работы с КГП (EcoSatMS)

The screenshot displays the EcoSatMS software interface, which includes a map view, a legend, and several data entry dialogs.

**Map View:** The main area shows a satellite map of a river system, specifically the Amudarya River, labeled "Amu Darya". A callout box provides geographical information:

- Долгота: 60.8186° Широта: 41.6107°
- Округ: Республика Узбекистан
- Область: Республика Каракалпакстан
- Район: Элликкалинский

**Information in point MSI (SENTINEL-2B):**

- Канал 3: 0.173 КСЯ
- Канал 4: 0.193 КСЯ
- Канал 8: 0.267 КСЯ

**Legend:** The legend on the left lists various monitoring objects, including "Pandj\_to\_Amu" (selected), "Kerki\_virtual\_43\_km\_before", "Kerki\_virtual\_135\_km\_before", "Kerki\_virtual\_32\_km\_before", "Nurek\_water\_reservoir", and "Kerki\_virtual\_1\_km\_before". It also includes buttons for "Редактировать" (Edit), "Удалить объект" (Delete object), and "Обновить список" (Update list).

**Data Entry Dialog:** A separate window titled "Занесение объекта в базу данных - Google Chrome" (Entering object into the database) is open, showing a form for adding a new object:

- Тип объекта: Виртуальный гидропост
- Период: с 2020-01-01 по 2020-08-02 (наблюдать постоянно)
- Краткое название контура: Amudarya\_test\_polygon
- Комментарий: КГП на Амударье, Узбекистан
- Наземный гидропост: Выберите гидропост
- Виртуальный гидропост: Выберите гидропост

**Bottom Left:** A table showing a list of observations (Наблюдений) with columns: ID, Date, Time, Sensor, Area, and Value.

	Наблюдений:	996	
№143158	2020-06-18 06:27:49	MSI га	21.73
№140441	2020-06-15 06:18:33	MSI га	21.17
№140442	2020-06-13 06:28:40	MSI га	20.72
№140443	2020-06-10 06:28:24	MSI га	21.81

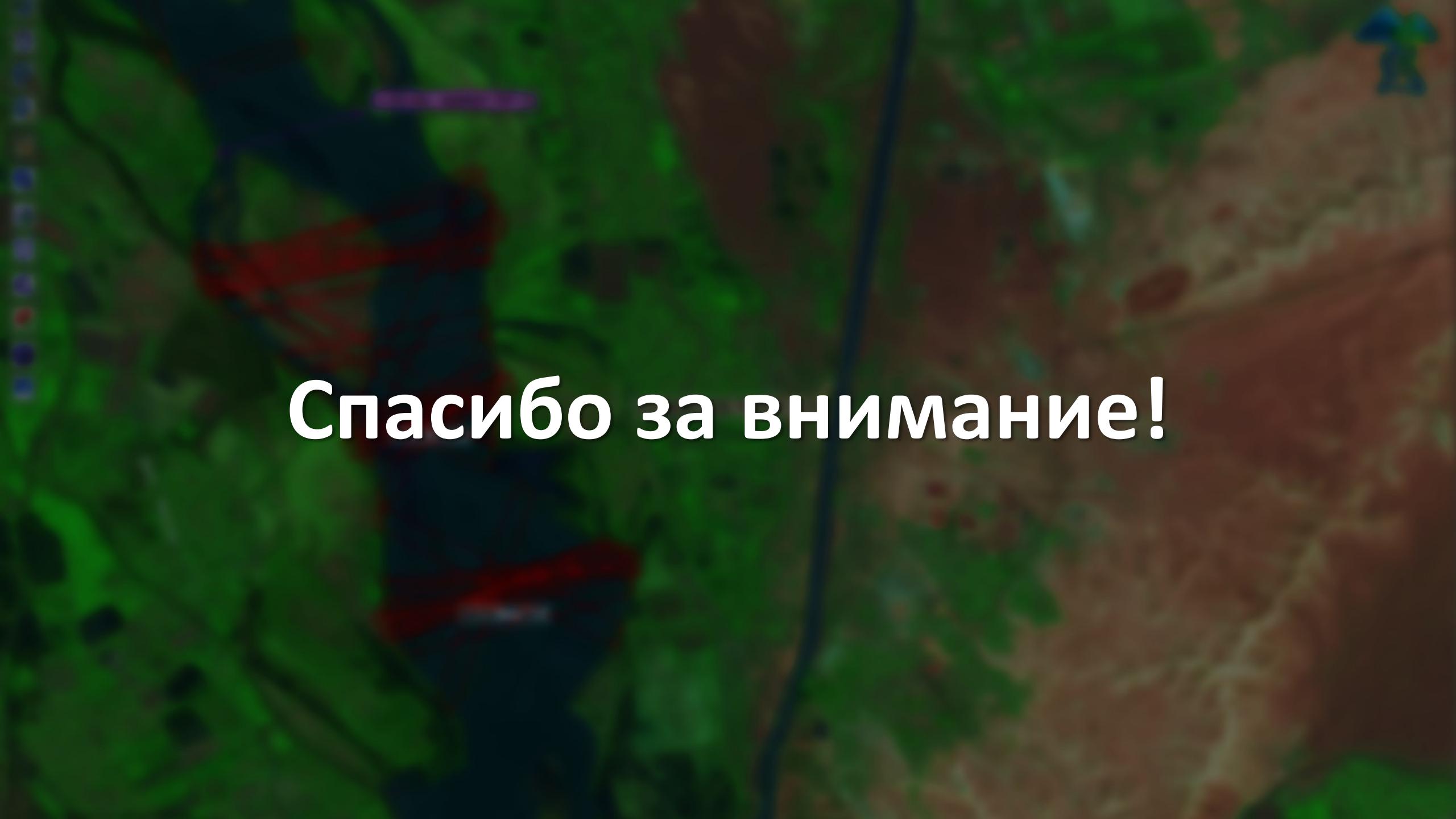
# Результаты

1. Предложен способ автоматического построения КГП по маске воды *Sentinel-2* (объем рутинной ручной работы уменьшился);
2. Предложен альтернативный метод калибровки КГП (по альтиметрии), который при корректной калибровке позволяет расширить ряды альтиметрических наблюдений;
3. По результатам экспериментов получена конфигурация для наилучшей калибровки и использования откалиброванных полигонов;
4. Автоматизированный подход построения полигонов для КГП на основе спутниковых композитов позволяет адаптировать процедуру в зависимости от региона и ширины реки;

# Перспективы развития подхода

1. Использование нескольких индексов при расчете площади ВЗ;
2. Интеграция разработанных методов (автогенерация КГП и калибровка с поиском оптимальных параметров) в систему EcoSatMS;
3. Работа с «неподходящими» участками русла и формирование корректных КГП около подспутниковых точек.
4. Оценка точности полученных «восстановленных» рядов по наземным данным уровней рек.

Методика подразумевает масштабирование сети КГП на других реках ЦА и в аридных регионах, а также работу по валидации краткосрочных прогнозов с наземными данными.



Спасибо за внимание!