

# Возможности калибровки космических гидропостов по данным альтиметрии 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	Термез	Узбекистан	Работает
3	Келиф	Туркменистан	Работает
4	Мукры		Работает
5	Атамурат		Работает
6	Карабекавул		Не работает
7	Туркменабат		Работает
8	Ильчик		Не работает
9	Бир-Ата		Работает
10	Лебап		Работает
11	Туямуюн	Узбекистан	Работает
12	Ташсака		Работает
13	Беруни		Работает
14	Кипчак		Работает
15	Кызкеткен		Работает
16	Саманбай		Работает
17	Кызылджар		Работает
18	Порлатау		Работает

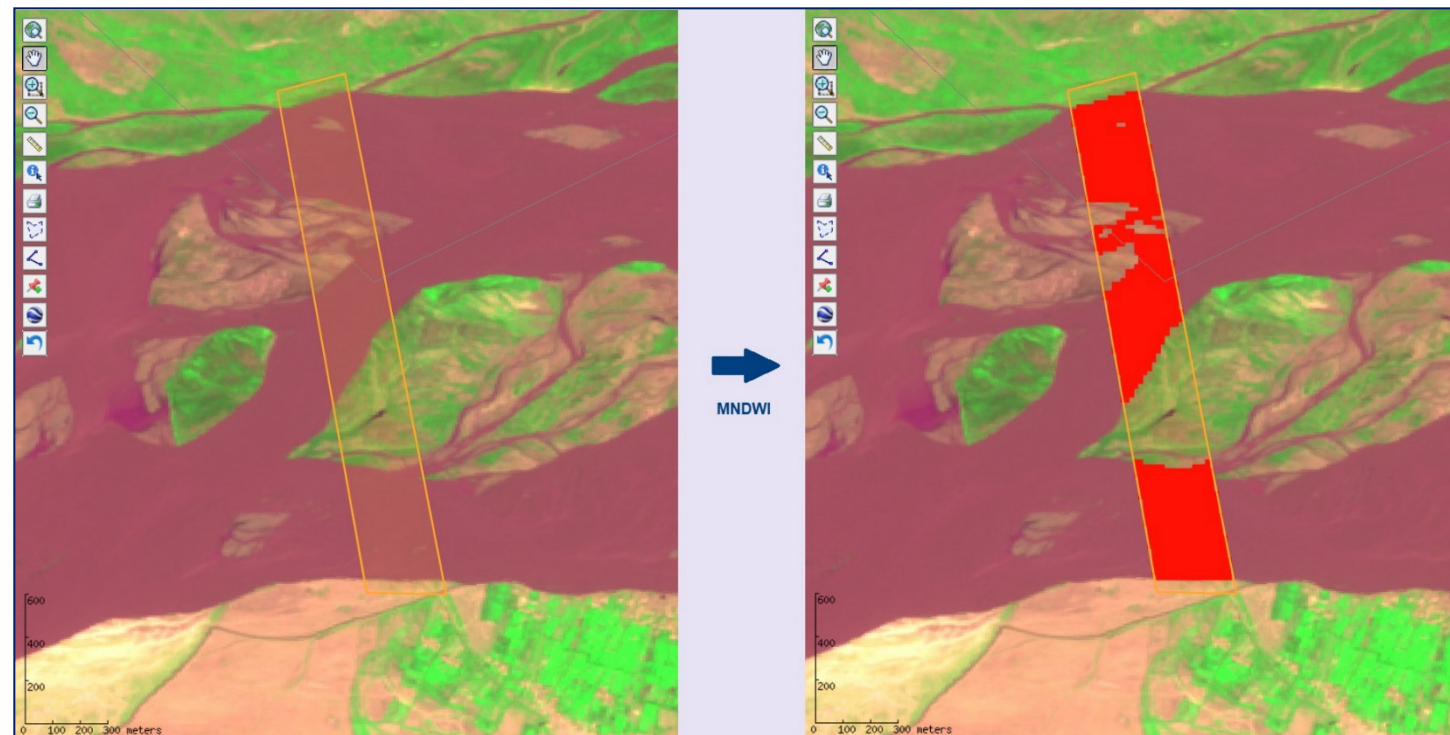
**15 активных**  
измерительных  
станций согласно  
данным на 1983 г.

# КГП – структурный элемент при построении сетей для мониторинга

КГП в месте разлива Амударьи



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



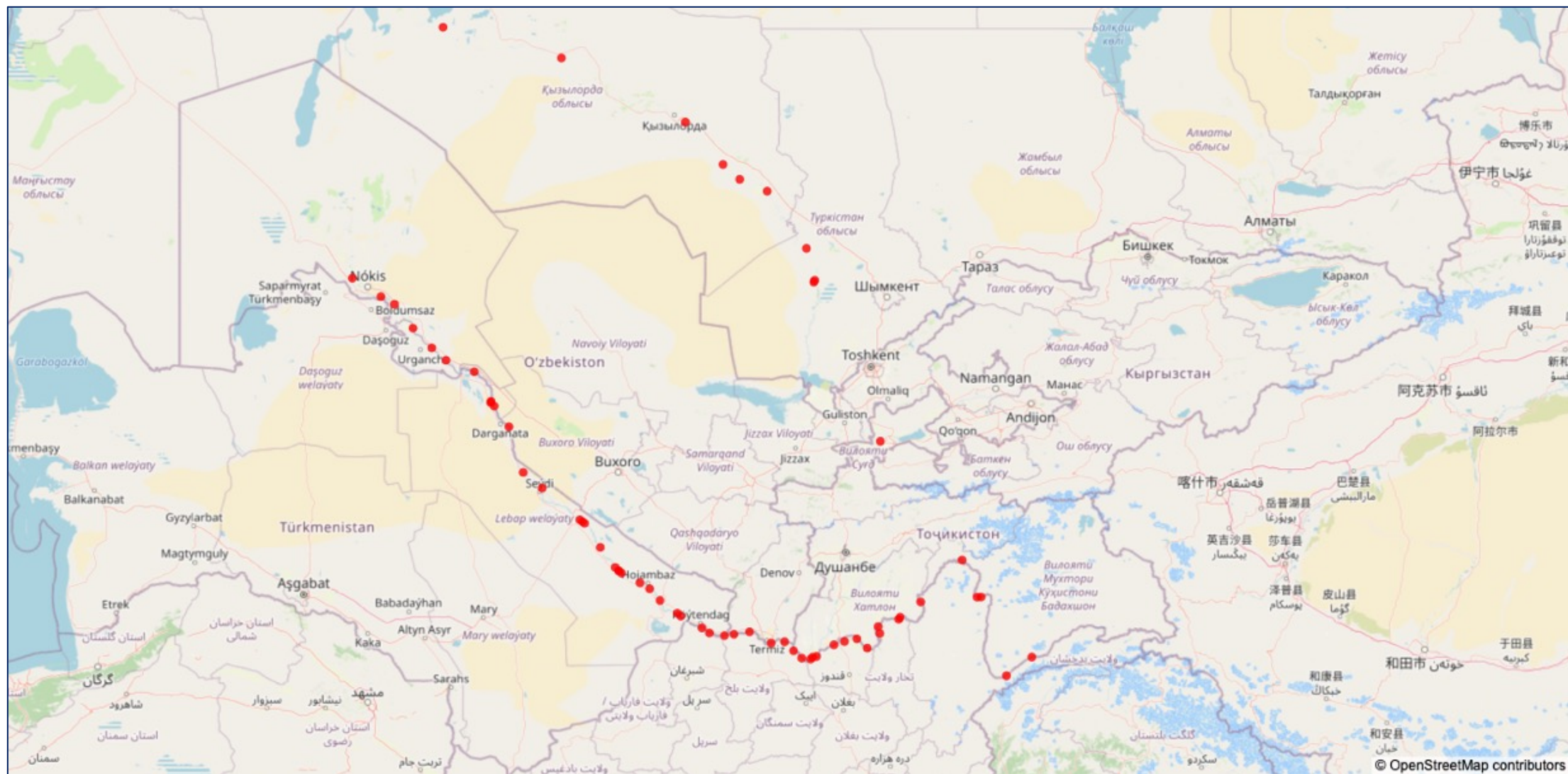
Оперативный расчет площади водного зеркала производится путем вычисления индекса MNDWI. Анализ множества спутниковых сцен из долговременных архивов для заданного периода занимает **несколько минут**

# Преимущества КГП

Наземная станция	Космический гидропост
Имеет ограничения по установке, в том числе территориально	Устанавливается как полигон на карте, количество фактически неограниченно
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



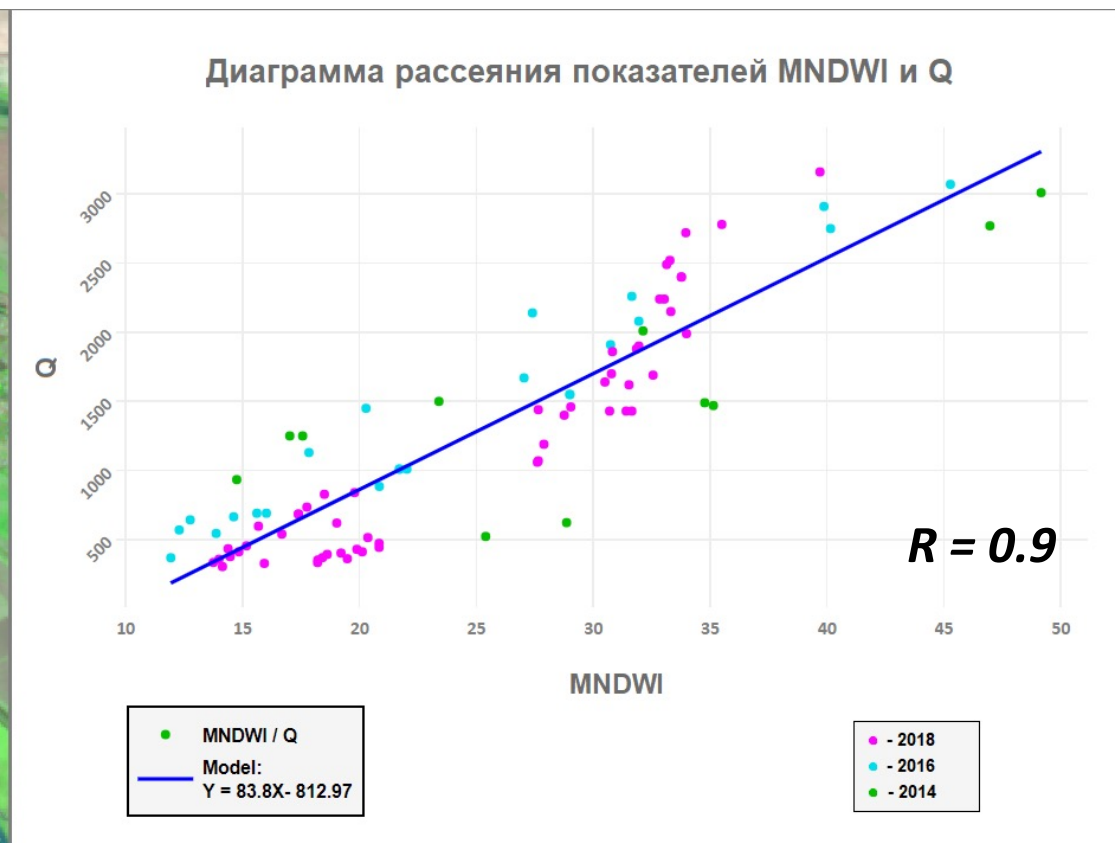
# Необходимость калибровки КГП

- *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



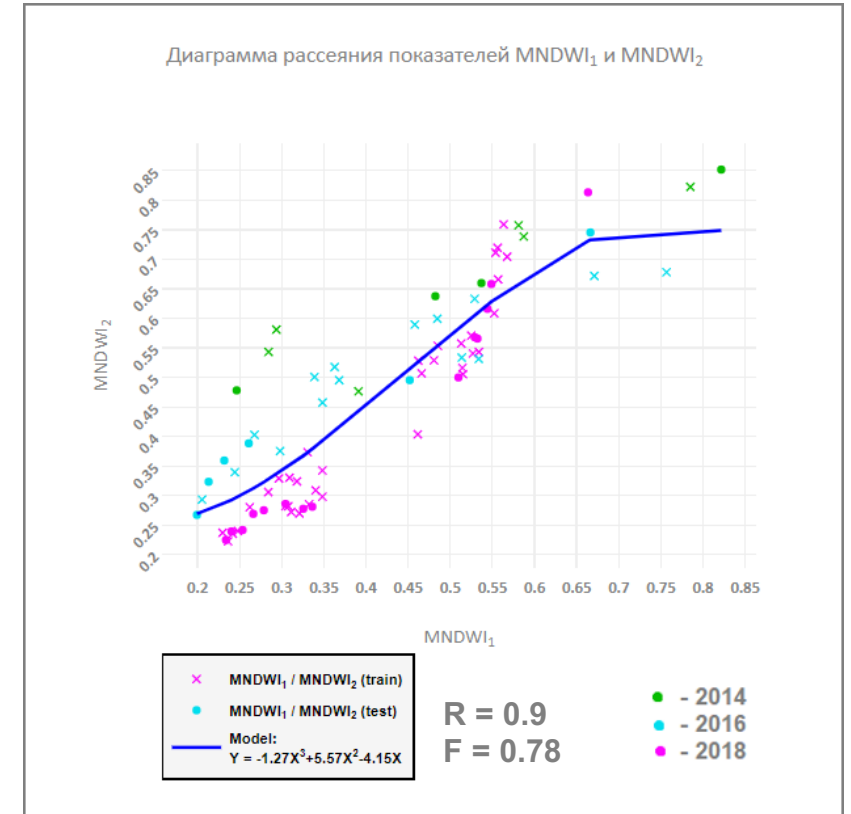
● 2014 ● 2016 ● 2018

# 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*

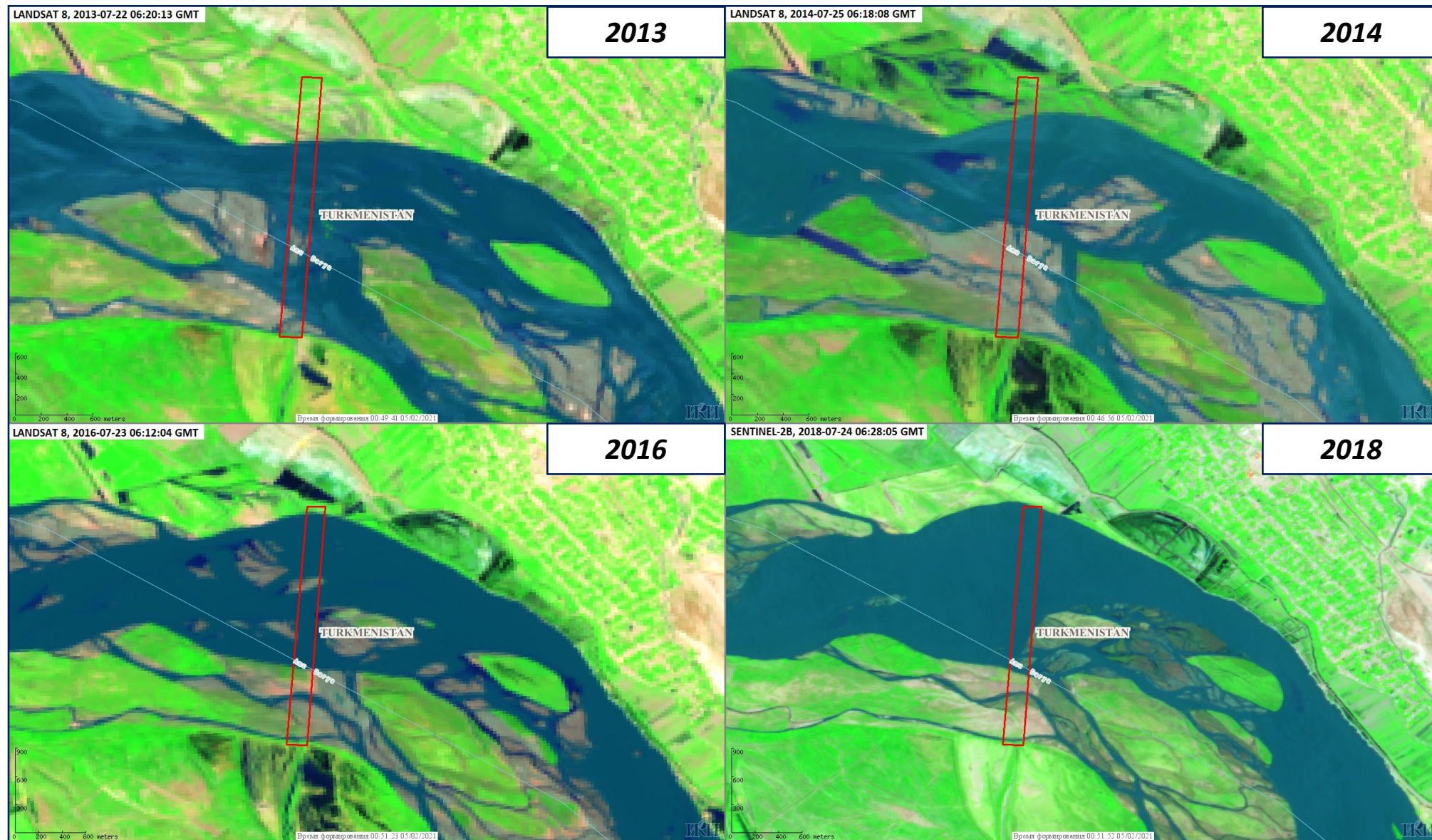
# Сложность выбора полигонов

*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**



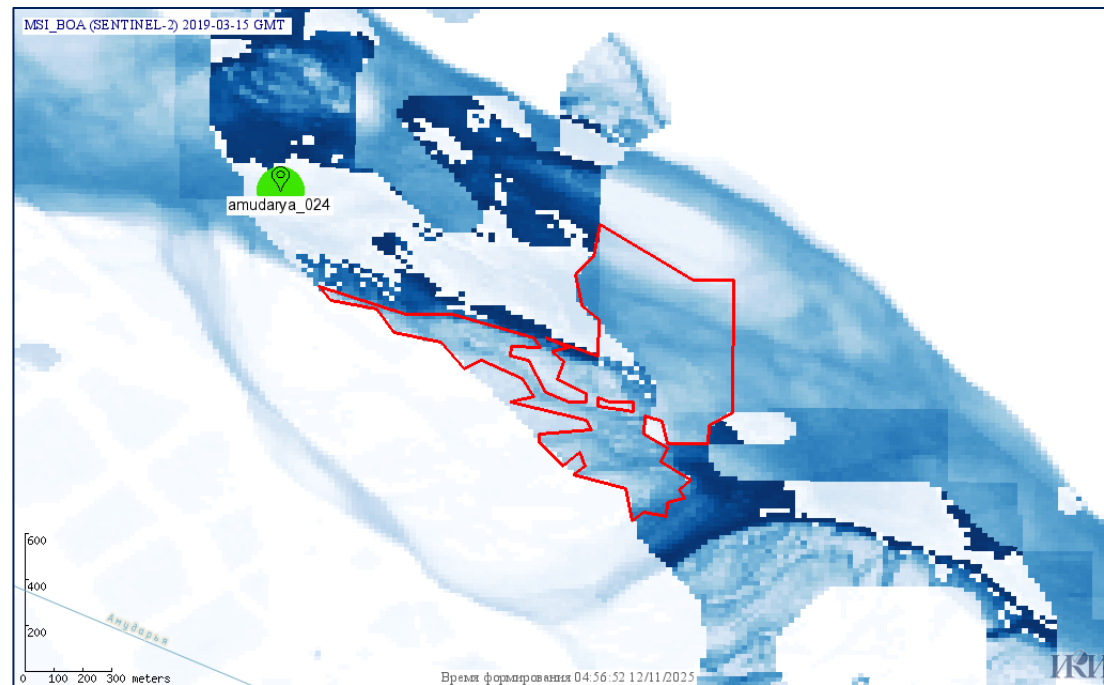
# Пример естественного смещения русла Амударьи



# 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 2х2 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**



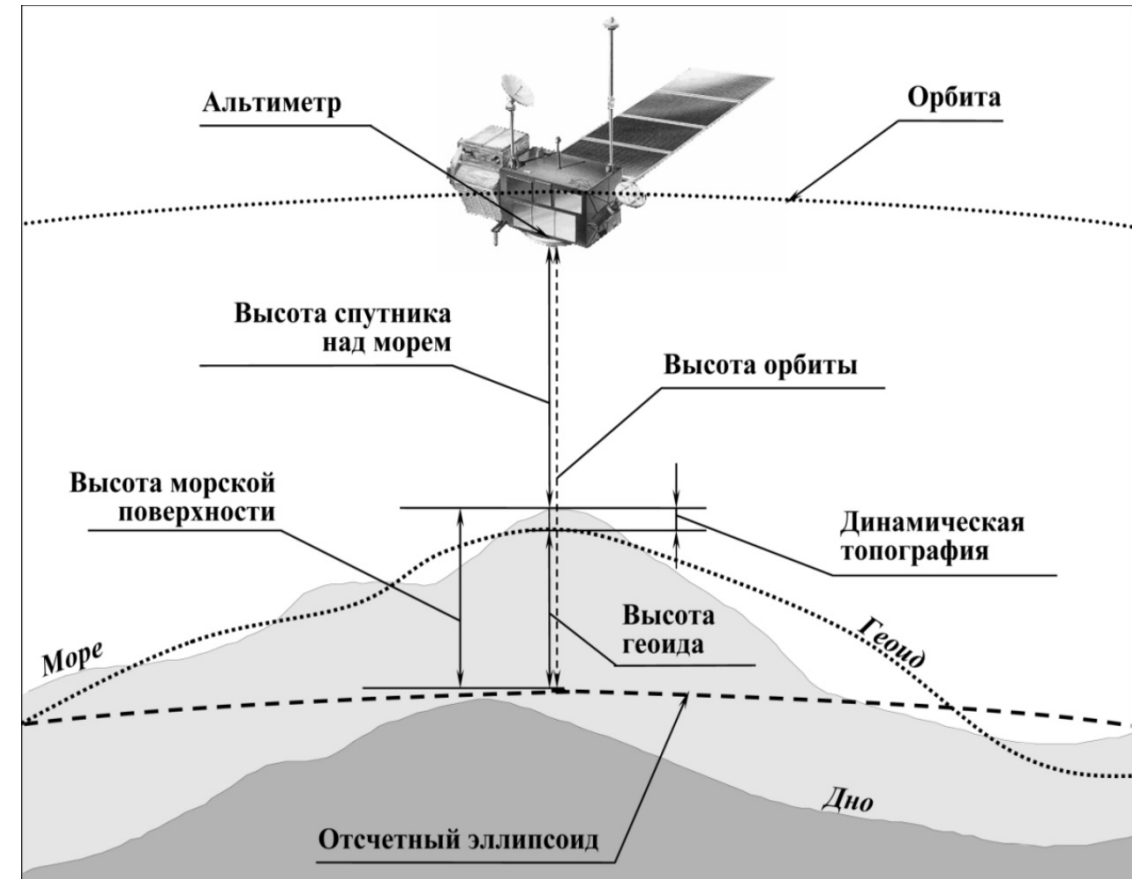
**amudarya\_012**



# Калибровка КГП при помощи альтиметрии

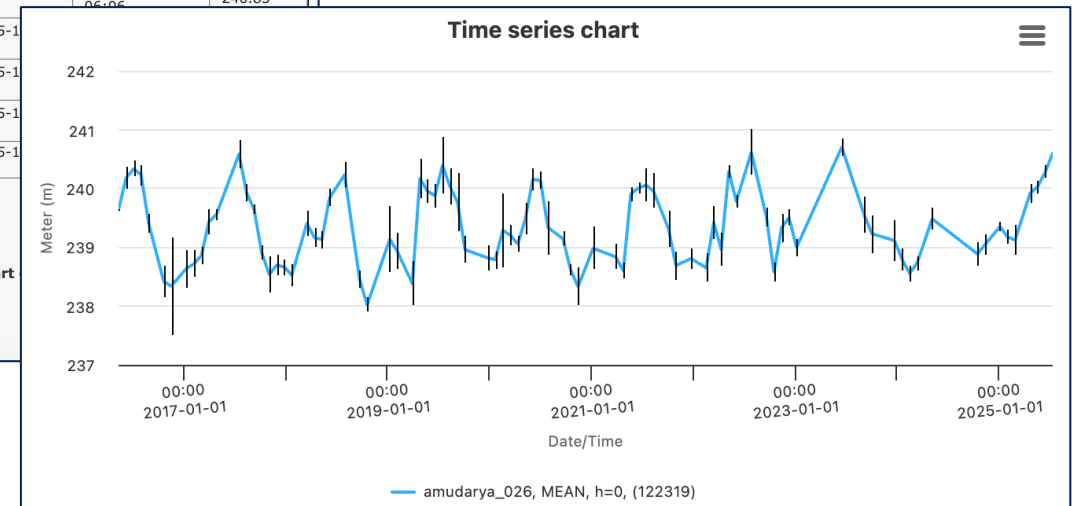
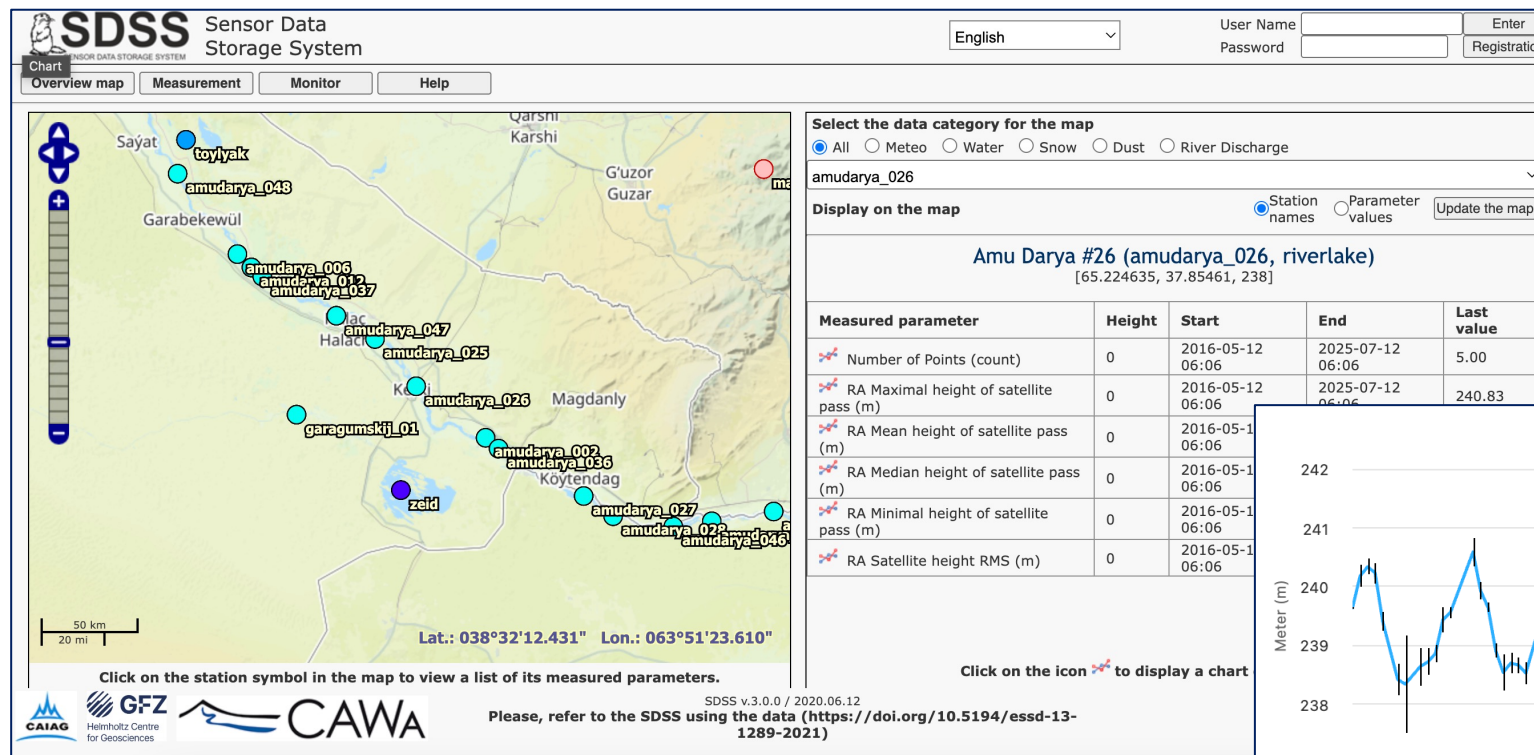
Выбрать открытый источник альтиметрических измерений, восстановив его данные каждого из них по оптическим сенсорам:

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 альтиметрии

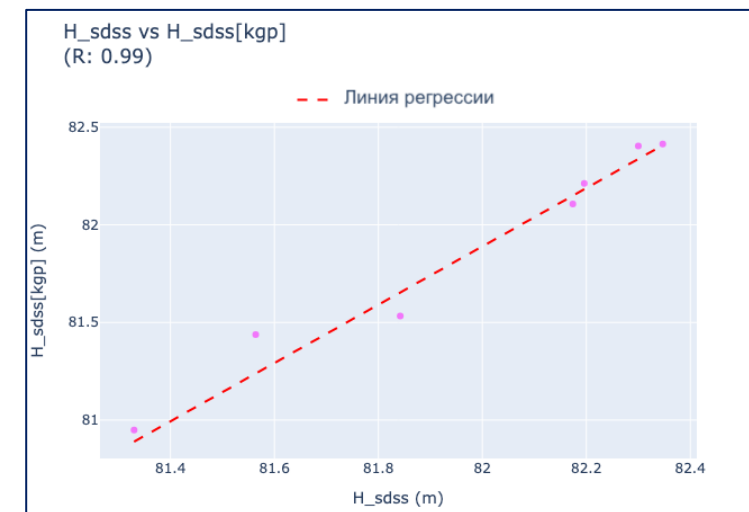
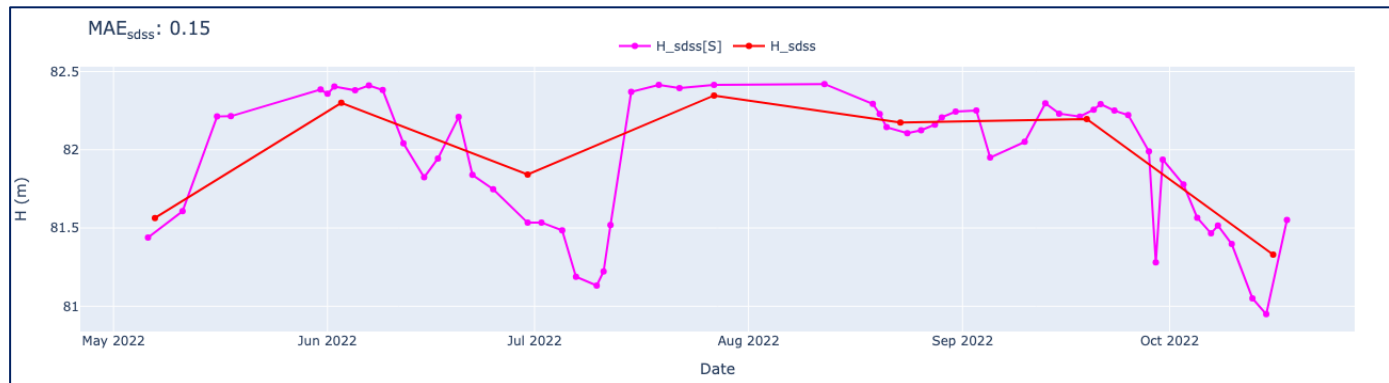
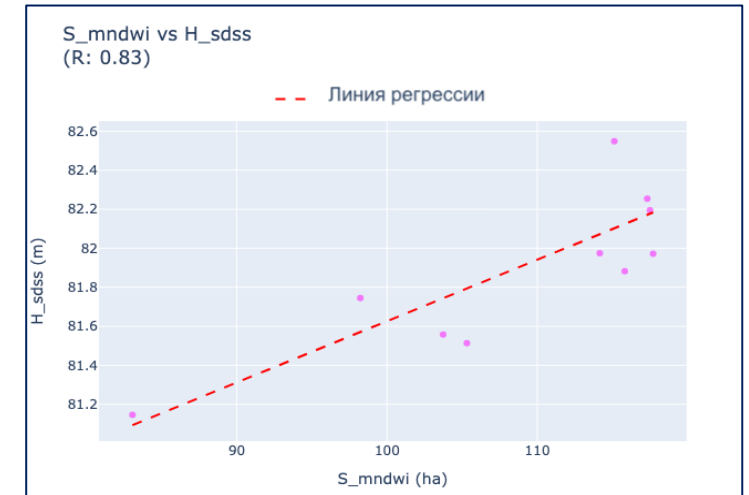
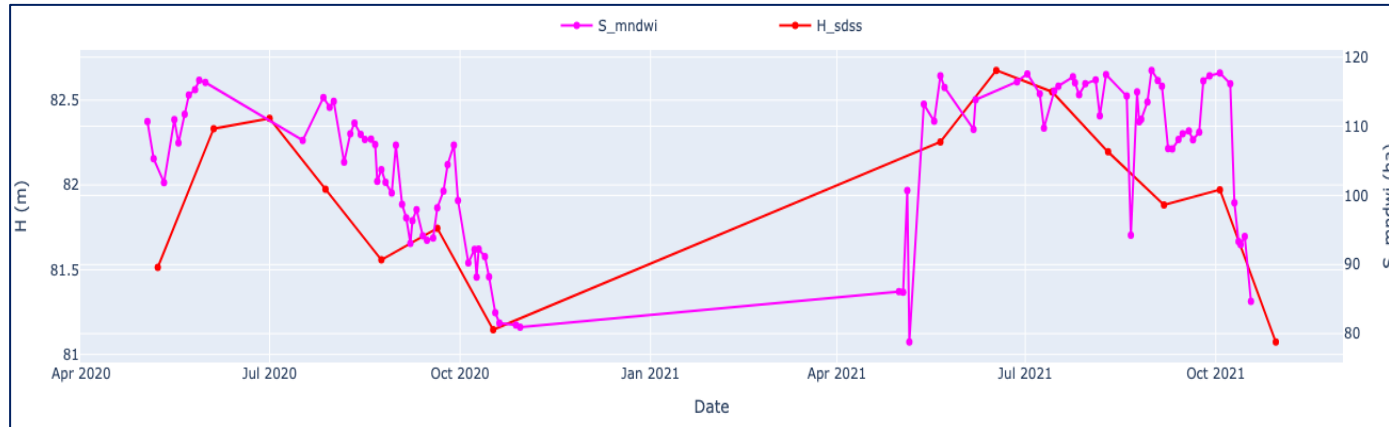
Система хранения сенсорных данных SDSS, временные ряды по альтиметрии формируются со спутников **Sentinel-3A**, **Sentinel-3B**, **Sentinel-6MF**, **Topex/Poseidon**, **Jason-1**, **-2**, **-3** (<https://sdss.caiaq.kg>).



# Калибровка КГП

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

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

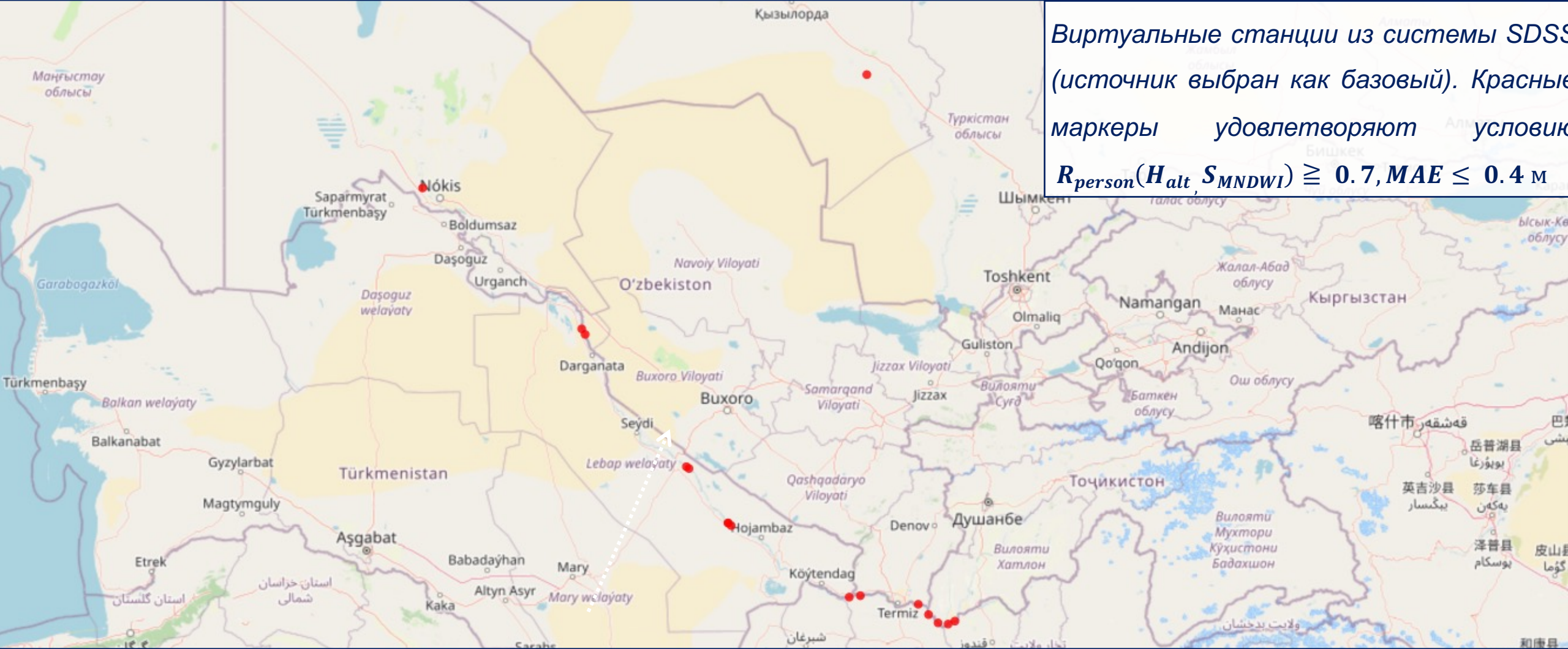


Квазиодновременные наблюдения для  $S$  и  $H$ :  $\pm 3$  дня

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



# Результаты калибровки



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

«Неподходящие» станции около русла Сырдарьи также были исключены в виду особенностей морфологии русла (невозможность сформировать динамический ряд площади  $B3$ )



# 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_ср (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	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>0,85</b>	<b>0,26</b>	<b>16</b>
				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	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>0,85</b>	<b>0,29</b>	<b>15</b>
				<b>3</b>	<b>2</b>	<b>0,8</b>	<b>0,3</b>	<b>15</b>
				3	3	0,85	0,27	11



<http://suvo.geosmis.ru/>

- *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 interface displays a satellite map of a region in Uzbekistan, with a red polygon highlighting a specific area. A popup window provides coordinates and MSI data for the selected point.

**Панель инструментов:** Включает кнопки для навигации (панорамирование, масштабирование), загрузки данных, и управления объектами.

**Наблюдение объектов:** ☒ Наблюдение объектов

☐ Наземные станции  
☐ Виртуальные гидропосты  
☐ Затопленные территории

**Список объектов:**

Объект	Дата	Статус
Kerki_virtual_43_km_befo...	2014-01-01	длящийся
<b>Pandj_to_Amu</b>	<b>2010-01-01</b>	<b>длящийся</b>
Kerki_virtual_135_km_bef...	2010-01-01	длящийся
Kerki_virtual_32_km_before	2014-01-01	длящийся
Nurek_water_reservoir	2011-10-01	длящийся
Kerki_virtual_1_km_before	2014-01-01	длящийся
	2010-01-01	

Действия: Редактировать, Удалить объект, Обновить список

Снять выделение, Перейти

**Дата:** с 2010-01-01 по 2020-08-02

Фильтр

**Список наблюдений:**

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

**Информация в точке по MSI (SENTINEL-2B):**

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

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

**Занесение объекта в базу данных проекта «Suvo»**

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

Послать данные Выход

# 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!**