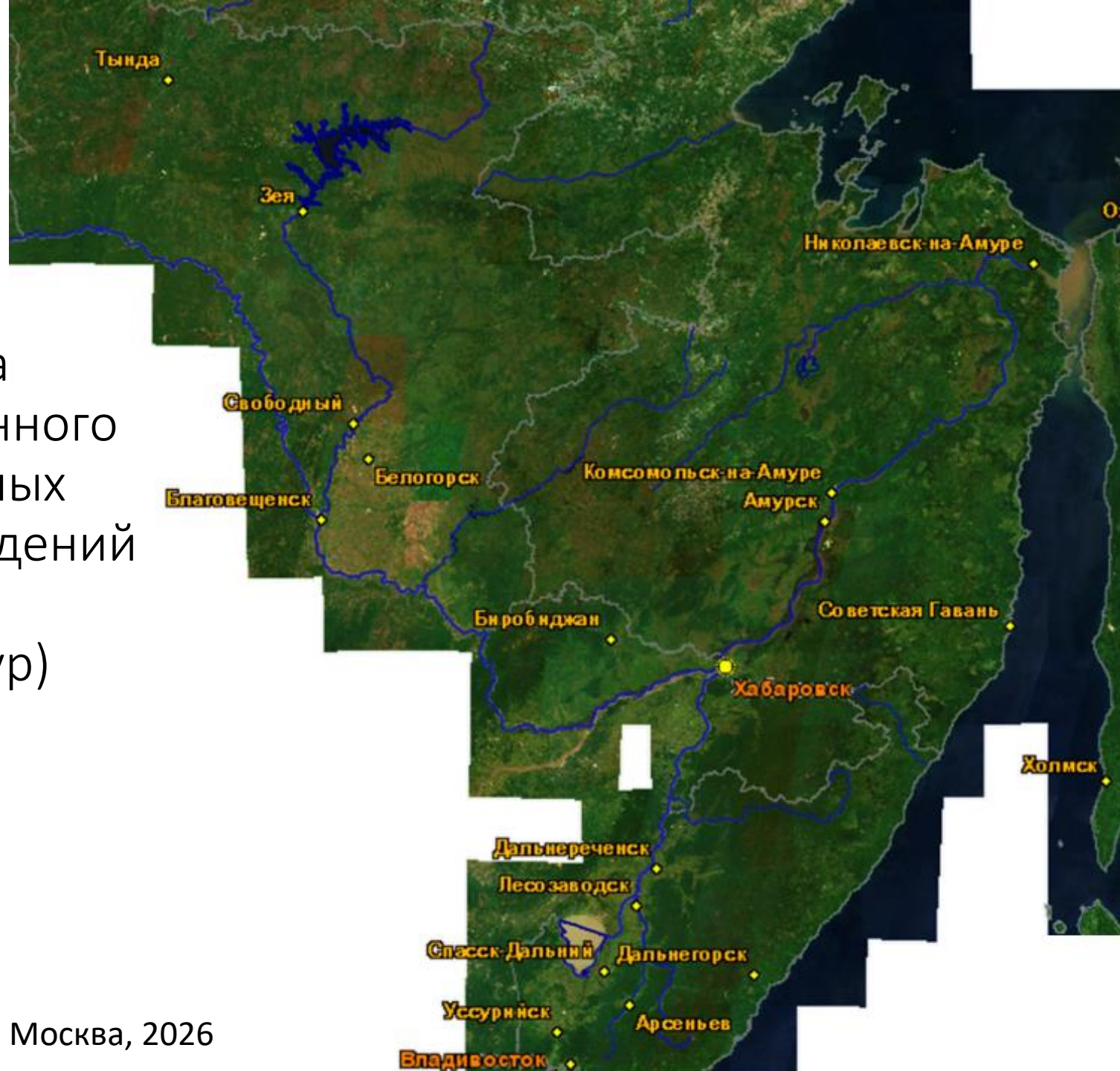
ИКИ
ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАН

ВЕГА-Гидро
http://hydro.geosmis.ru

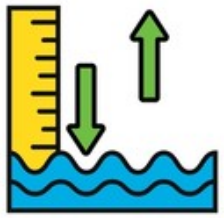


Применение метода пространственно-временного синтеза высокочастотных альтиметрических наблюдений уровней воды (на примере реки Амур)

Врублевский М.В., Бурцев М.А., Лупян Е.А.

Москва, 2026

Актуальность



Информация об уровне воды широко применяется в гидрологических приложениях.



Большинство территорий России характеризуется дефицитом гидрометеорологической информации: недостатком наземных гидропостов, их неравномерностью, недоступностью информации.



Использование данных спутниковой альтиметрии позволяет решить проблему низкой пространственной частоты наблюдательных станций, а открытое распространение данных – сложности получения информации об уровне воды.

Спутниковая альтиметрия

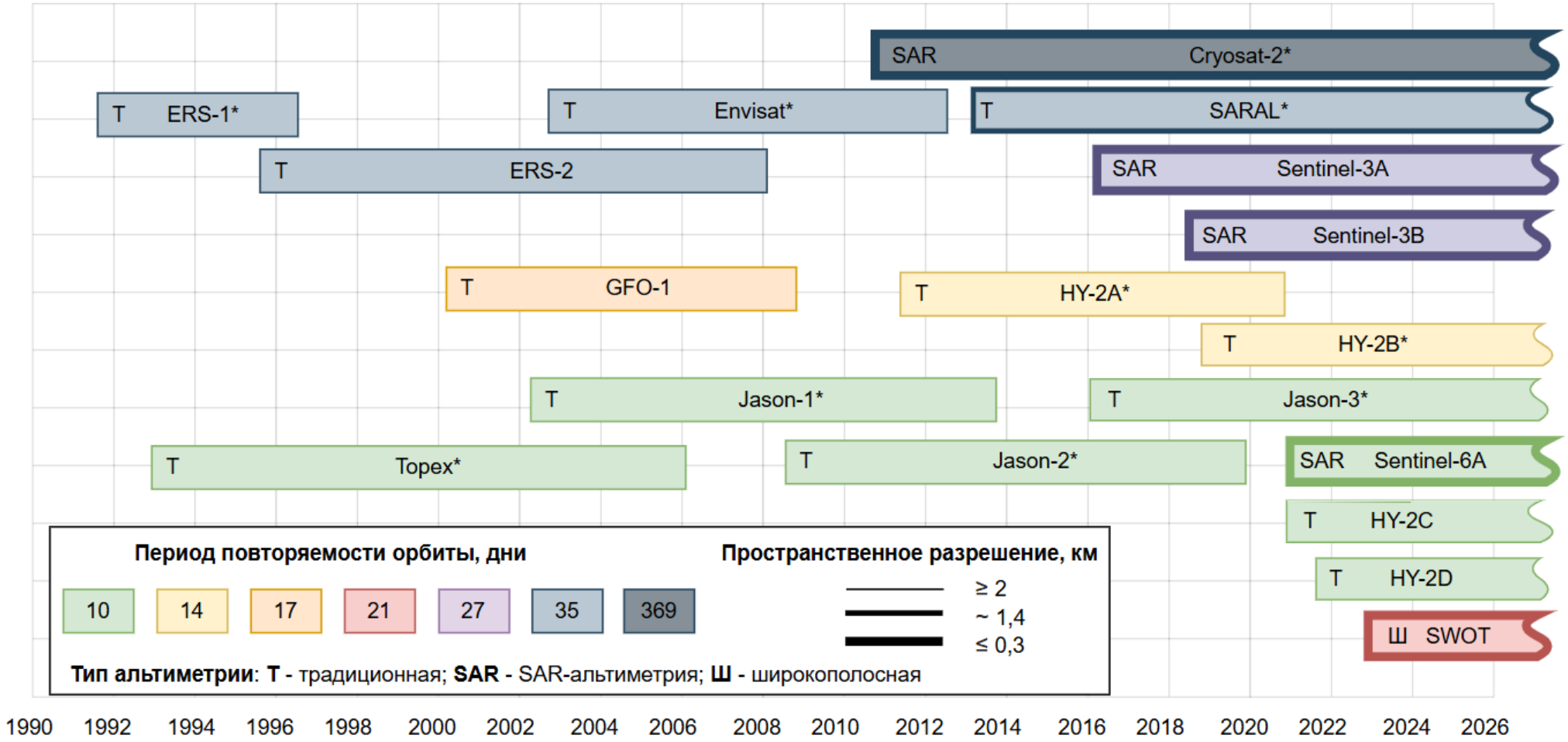
– это способ определения высоты поверхности относительно земного эллипсоида с помощью измерений с ИСЗ

Range=t*C/2 H=Alt-Range

- **Range** – расстояние от спутника до поверхности
- **h** – высота морской поверхности
- **Alt** (altitude) – высота спутника над опорным эллипсоидом



Миссии альтиметрии

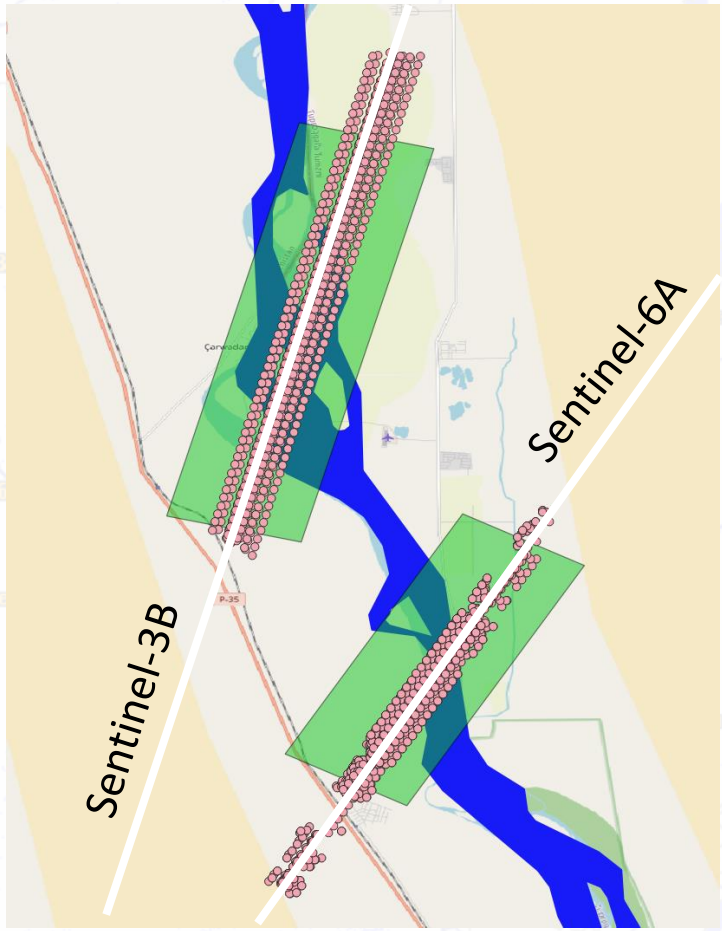


Хронология миссий спутниковой радиолокационной альтиметрии.

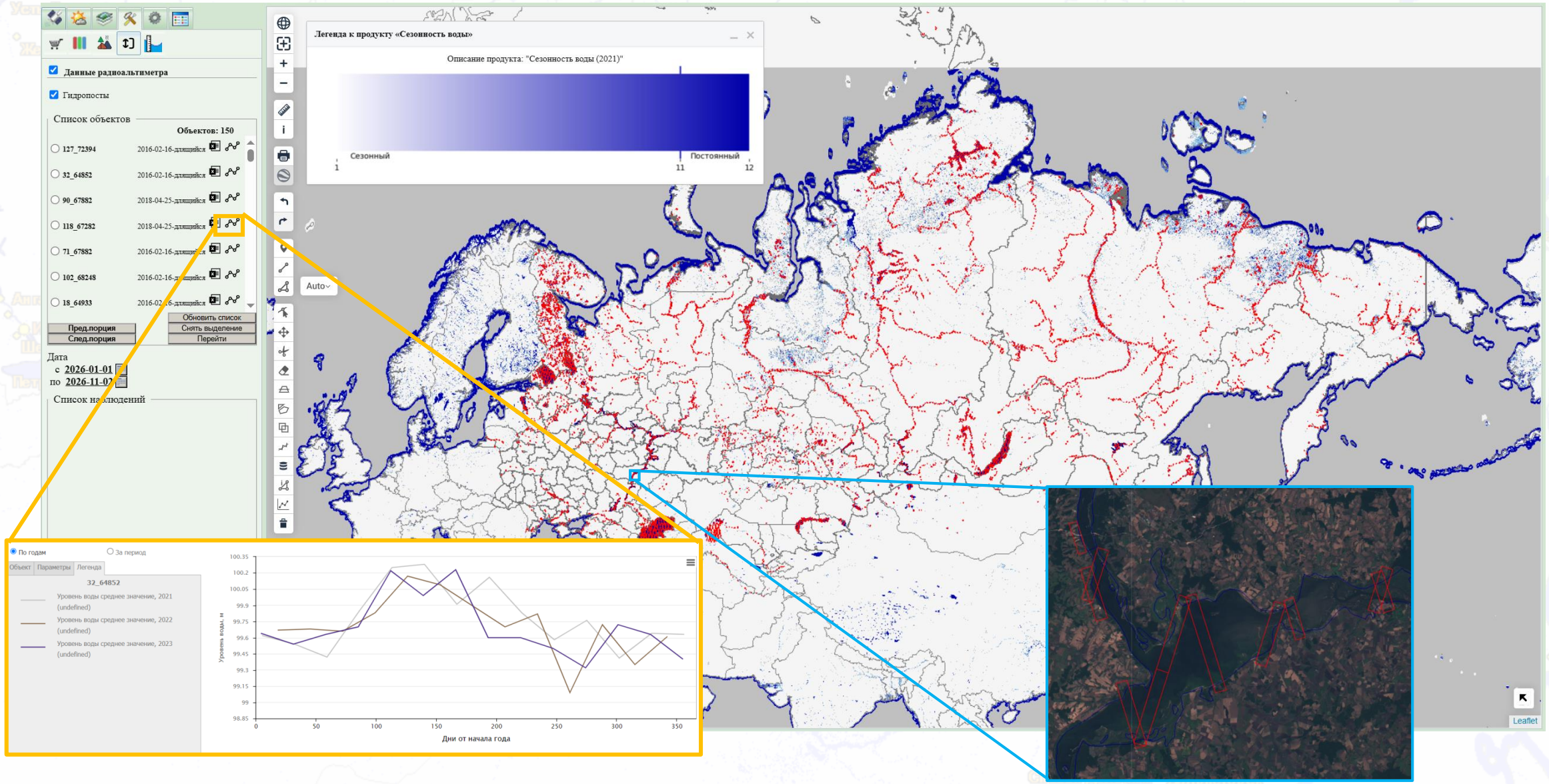
Миссии, отмеченные символом «*», имели несколько фаз, в том числе с отличным от указанного цветом периодом повторного наблюдения

Гидропосты альтиметрии - АГП

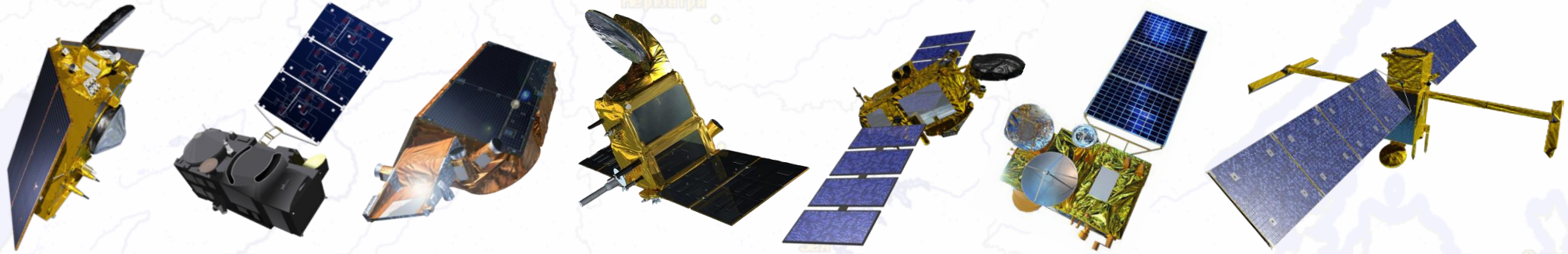
Альтиметрические гидропосты (АГП)
– виртуальные полигоны, образованные пересечением трека спутника и границ водоёма.
Это позволяет вести измерения в постоянных точках наблюдения, что делает АГП спутниковой альтернативой наземным гидропостам (НГП).



Система мониторинга уровня воды по данным спутниковой радиолокационной альтиметрии в «Веге-Гидро»



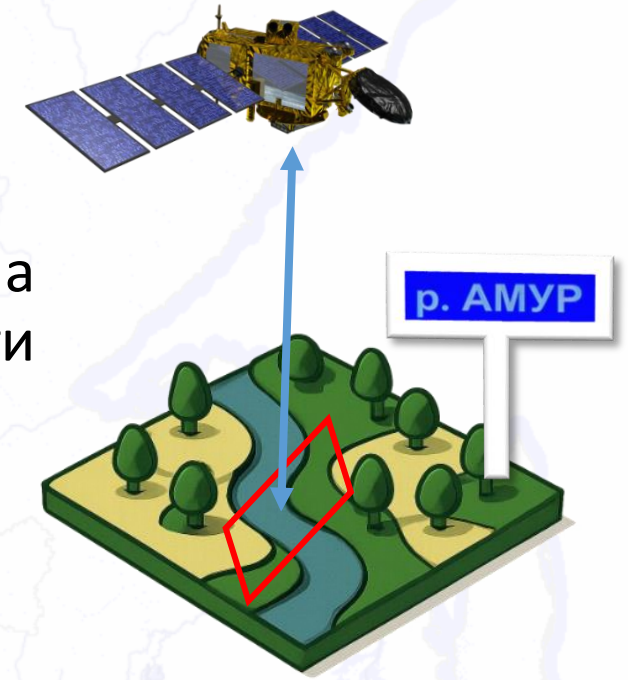
Текущие миссии альтиметрии



Спутник	Sentinel-3	Sentinel-6	CRYOSAT-2	SARAL	Jason-3	HY-2B,-2C,-2D	SWOT
Дата старта	02.16.2016	21.11.2020	04.08.2010	25.02.2013	01.17.2016	2018,2020,2021	16.12.2022
Средняя высота орбиты, км	814.5	1336	717	800	1336	973,957,971	857
Наклонение	98.65°	66°	92°	98.55°	66°	99.3°,66°,66°	77.6°
Период	**27 дней**	**10 дней**	**369 дней**	**35 дней**	**10 дней**	**14,10,10 дней**	**21 день**
Разрешение	~ 300 м	~ 300 м	~ 250 м	~ 1.4 км	~ 2 км	~ 2 км	В зависимости от продукта от десятков м до ~ 2 км
Тип альтиметрии	SAR-альтиметрия			Традиционная альтиметрия			Широкополосная

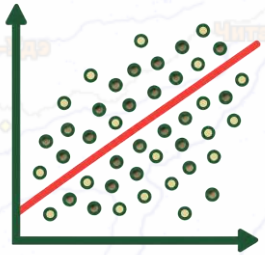
AVISO

Цель работы

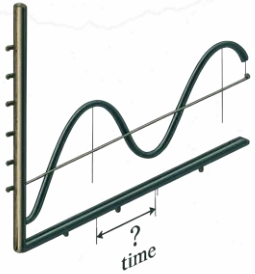


1. Провести эксперимент по реализации метода СВАН на реке Амур для оценки работоспособности предложенного подхода.

Критерии

2. 

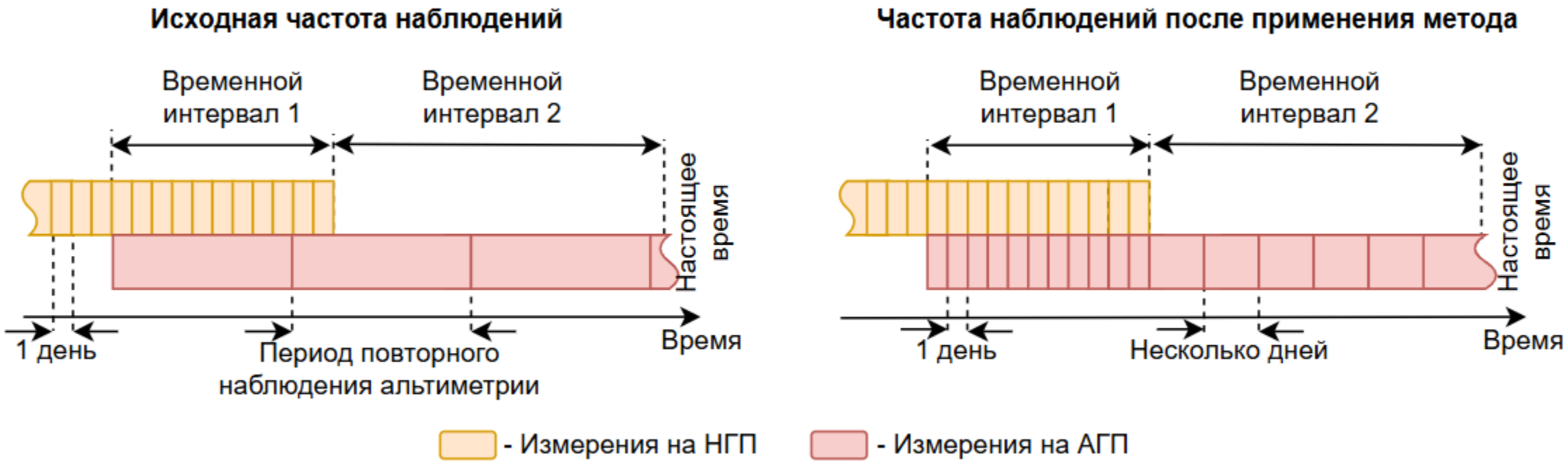
Точность метода:
оценки погрешности восстановленных данных

3. 

Результирующая частота:
оценка дискретности восстановленных данных

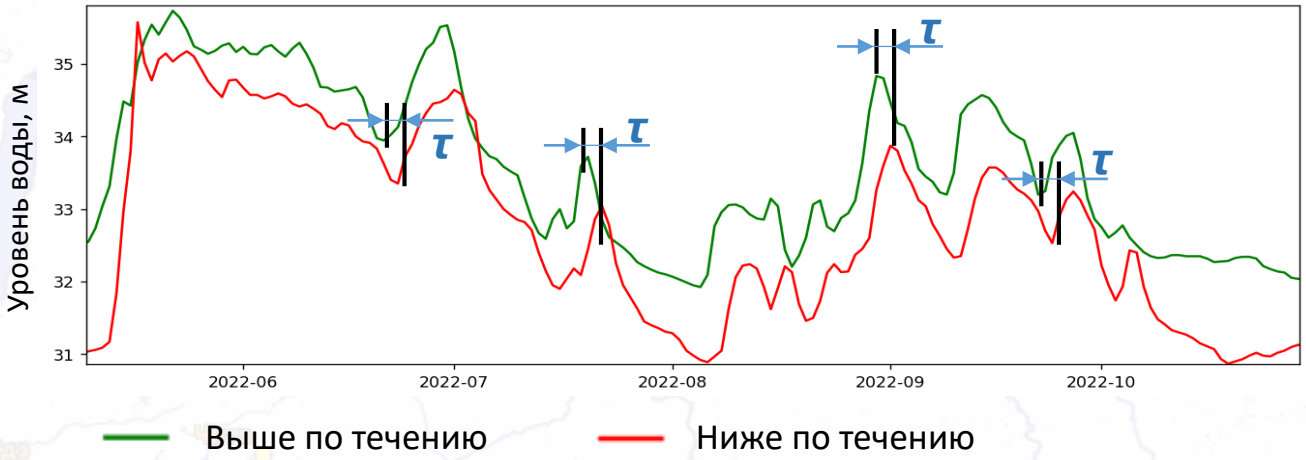
Задача метода СВАН – метода пространственно-временного синтеза высокочастотных альтиметрических наблюдений уровней воды

Повысить частоту наблюдений уровня воды на реке Амур



Базовые подходы, использованные при разработке метода

Определение времени добегания

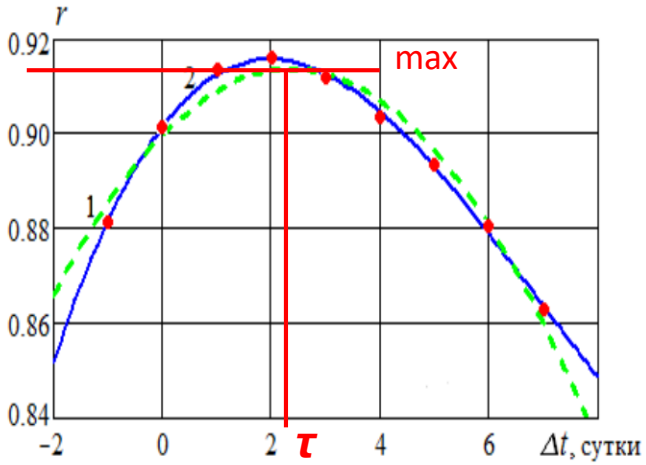


τ - время добегания

уравнение степенной регрессии порядка m:

$$rt(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \ldots + a_m t^m .$$

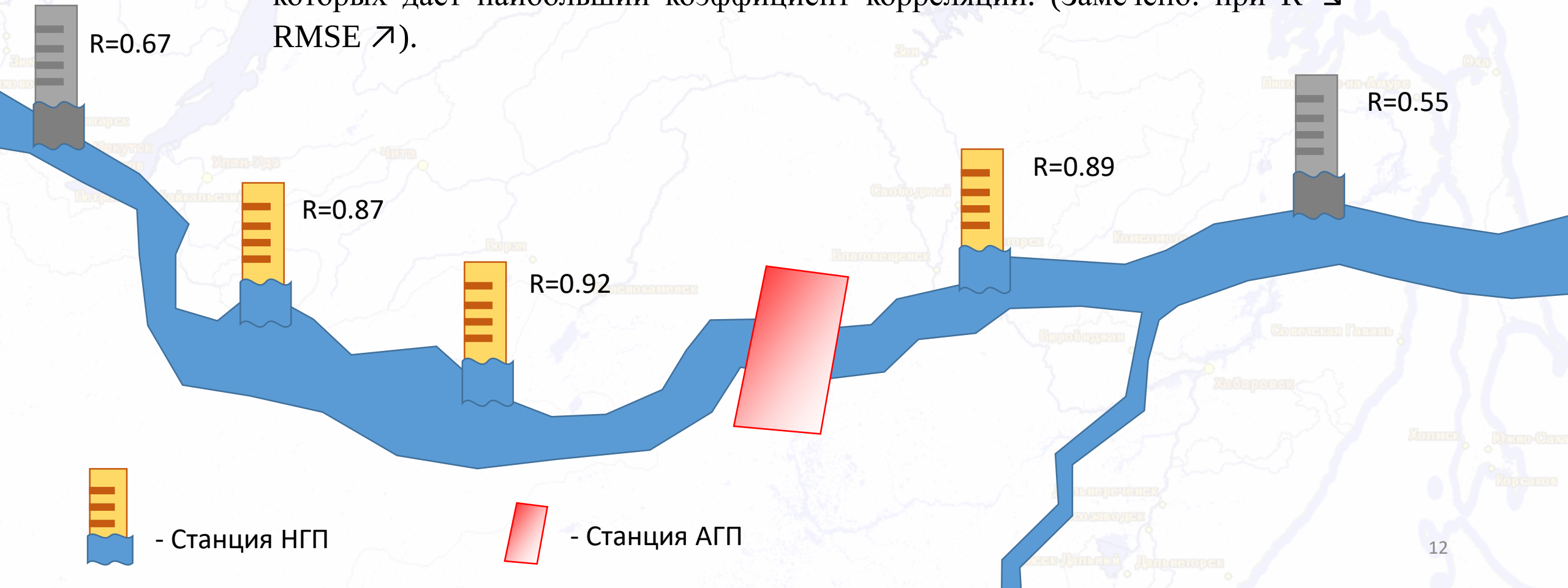
$$\tau = \frac{a_2 + \sqrt{a_2^2 - 3a_1 a_3}}{-3a_3}$$



К расчету времени добегания методом корреляционного анализа (на примере реки Мсты) / В.А. Наумов // Вестник науки и образования Северо-Запада России: электронный журнал. - 2020. - Т. 6, № 4. - С. 24-31.

Оптимальный выбор опорных ГП

1. Список ГП, в пределах некоторого расстояния.
2. Выбор N ГП с наибольшим R. Где N – вручную задаваемый параметр.
3. В качестве оптимального набора опорных ГП выбираются те, комбинация которых дает наибольший коэффициент корреляции. (Замечено: при R ↘ - RMSE ↗).



Модель восстановления уровней воды

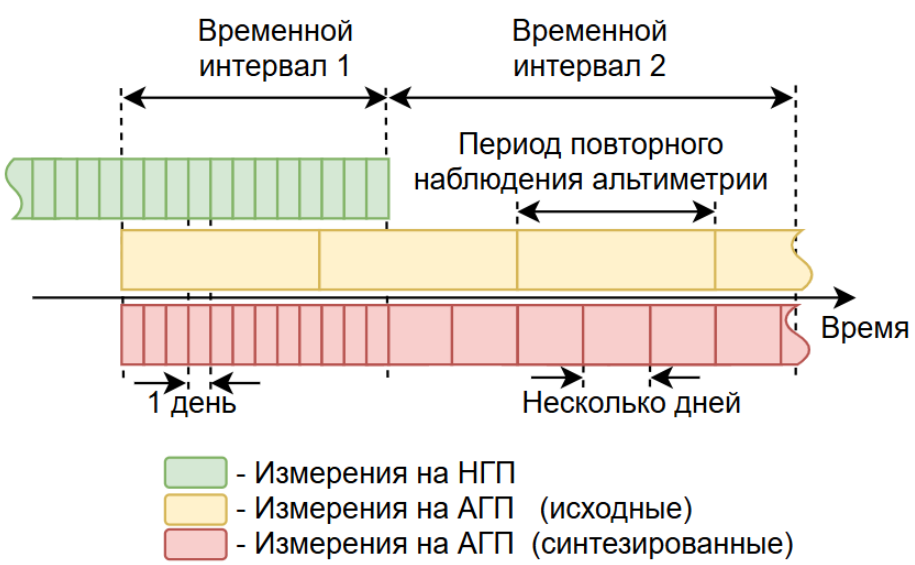
$$wl(t) = a + \sum b_i \cdot x_i(t - \tau),$$

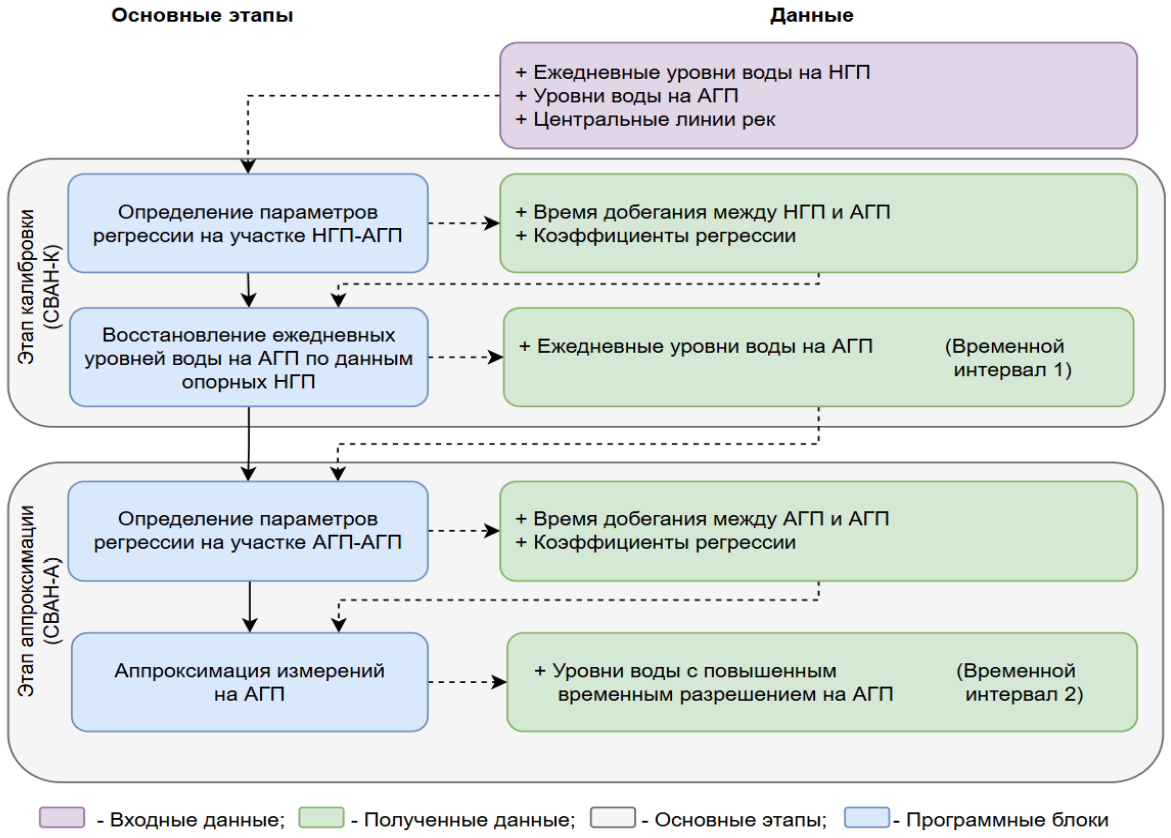
где

$wl(t)$ – уровень воды в дату наблюдений t на АГП;
a, b_i – коэффициенты регрессии;
$x_i(t - \tau)$ – измерения уровня воды на i-том наземном гидропосту;
τ – время добегания.

Борщ С. В., Симонов Ю. А., Христофоров А. В., Юмина Н. М. Краткосрочное прогнозирование уровней воды на реке Амур // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2017. № 44. С. 136-151

Метод пространственно-временного синтеза высокочастотных альтиметрических наблюдений уровней воды

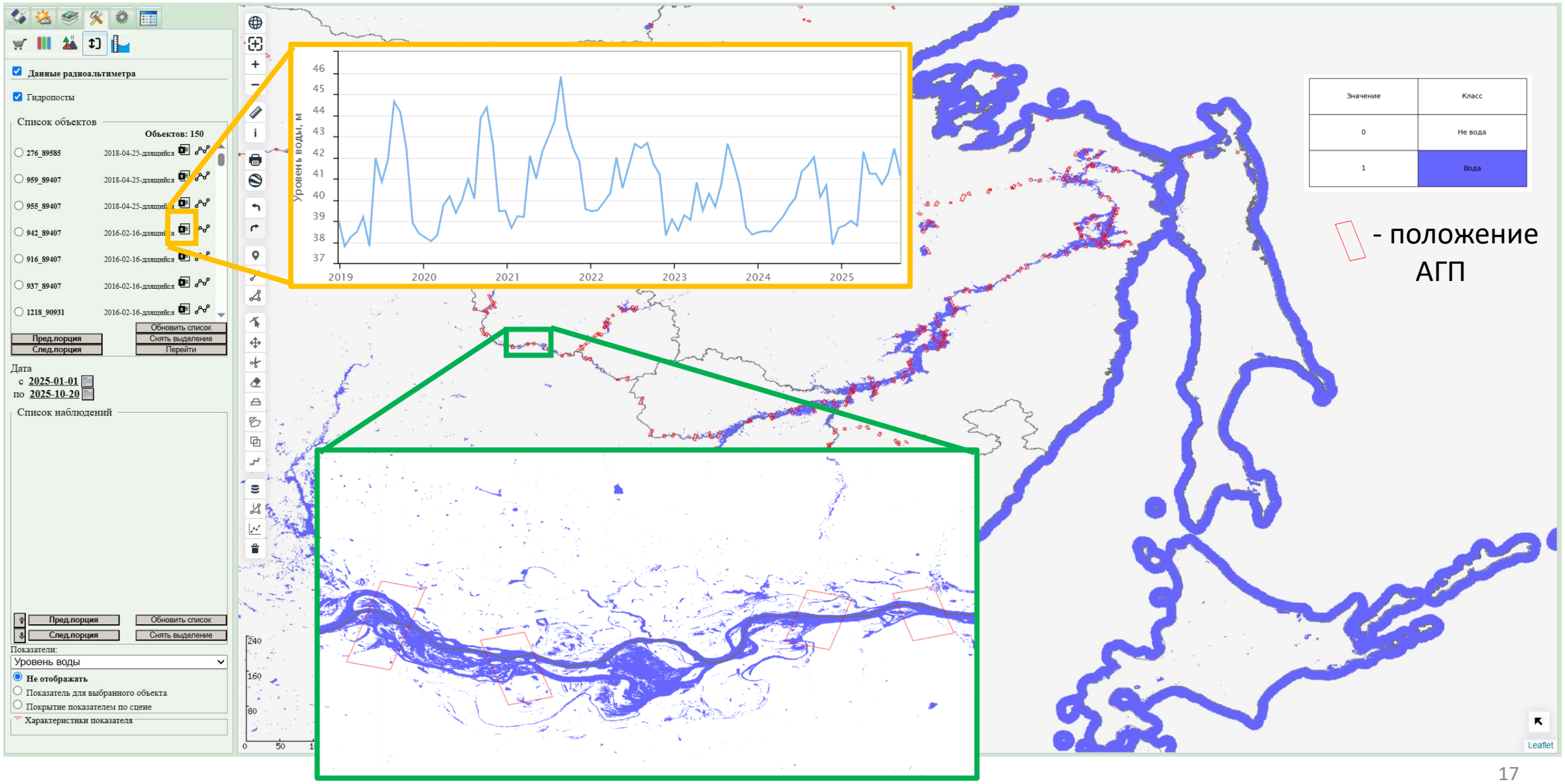




Эксперимент по применению предложенного подхода

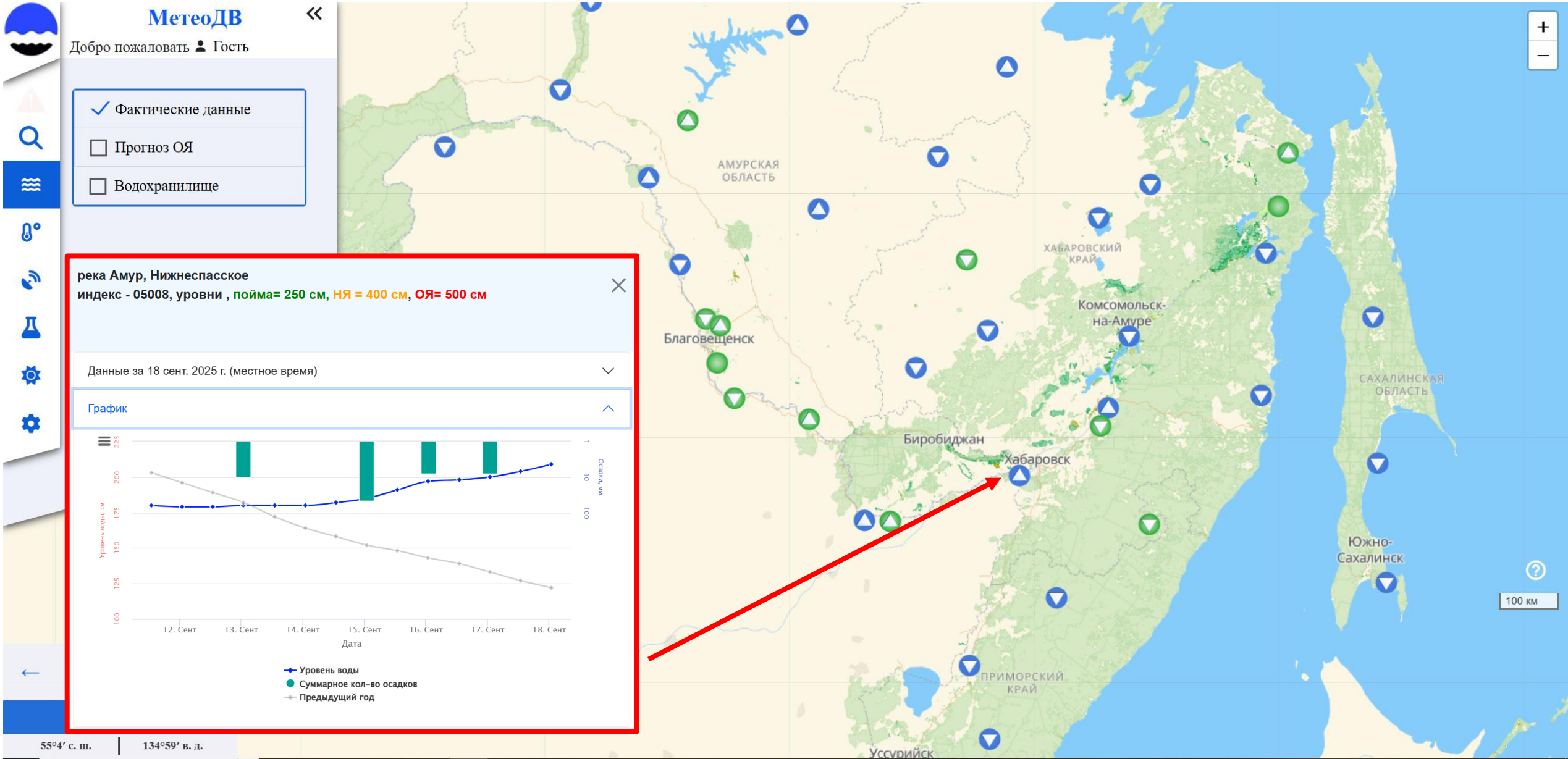
Использованные данные

Использованные данные: гидропосты альтиметрии (Вега-Гидро)



Подложка – максимальная площадь воды, GSW, Pekel

Использованные данные: наземные гидропосты



Сеть гидропостов альтиметрии и наземных (Вега-Гидро)

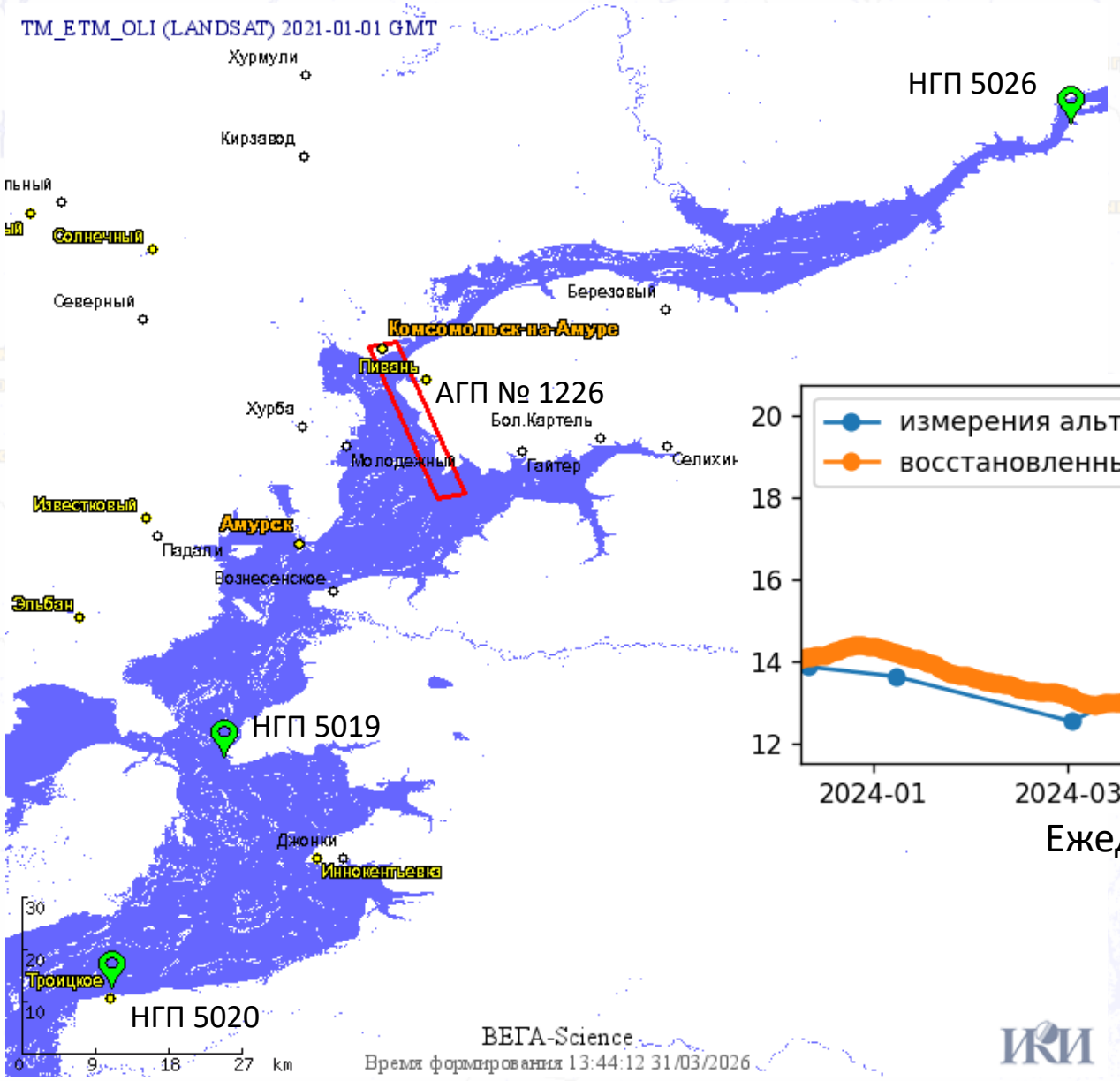


- наземные гидропосты, - положение АГП

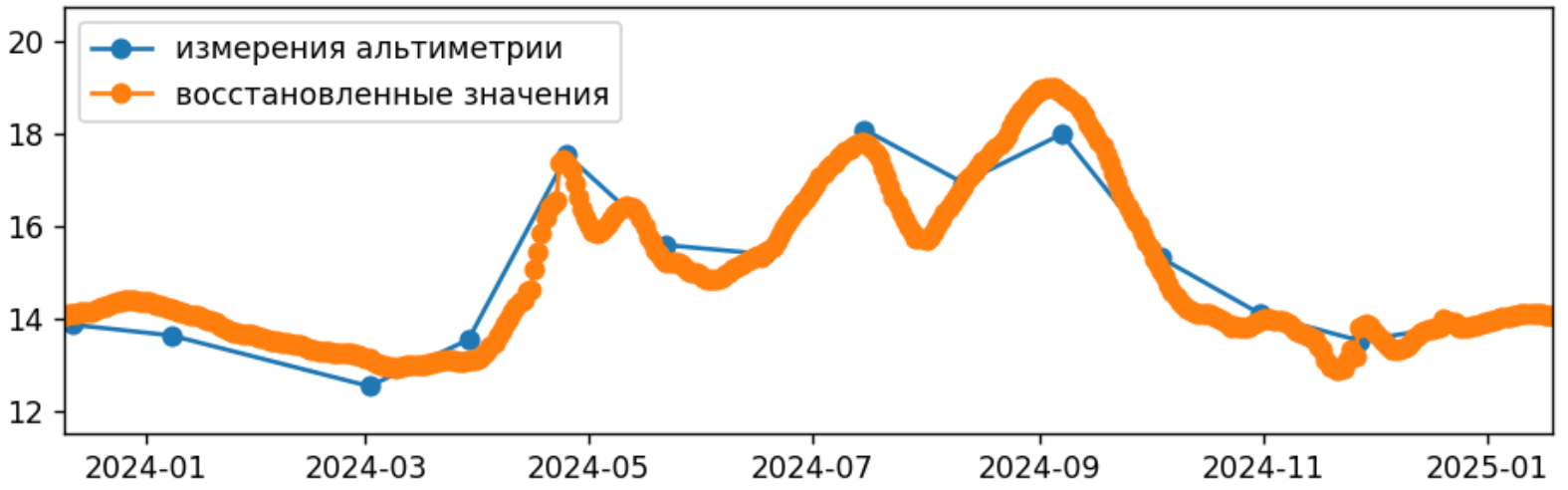
Подложка – максимальная площадь воды, GSW, Pekel

Результаты

Пример синтезированного ряда СВАН-К



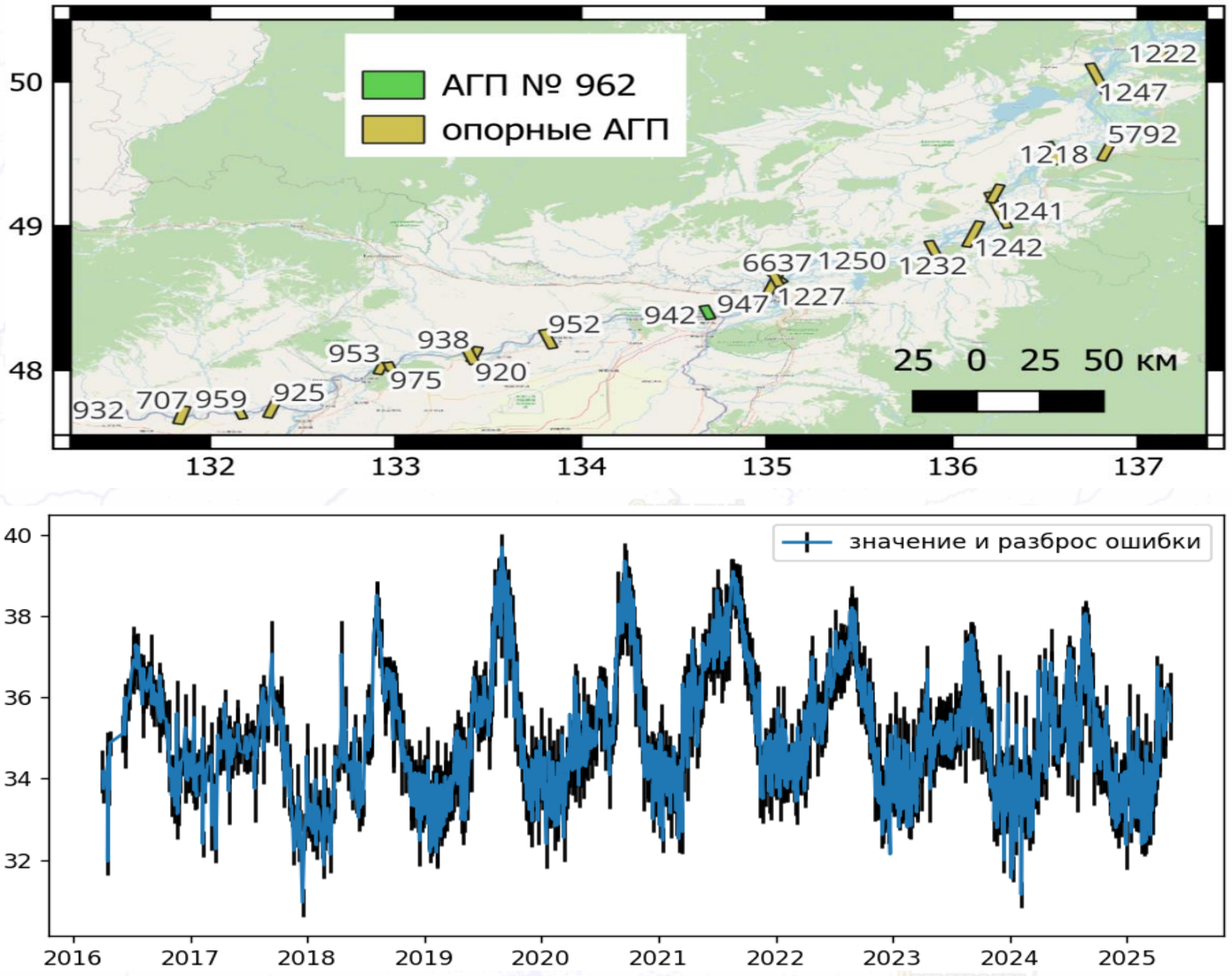
$$wl(t) = a + \sum b_i \cdot x_i(t - \tau)$$



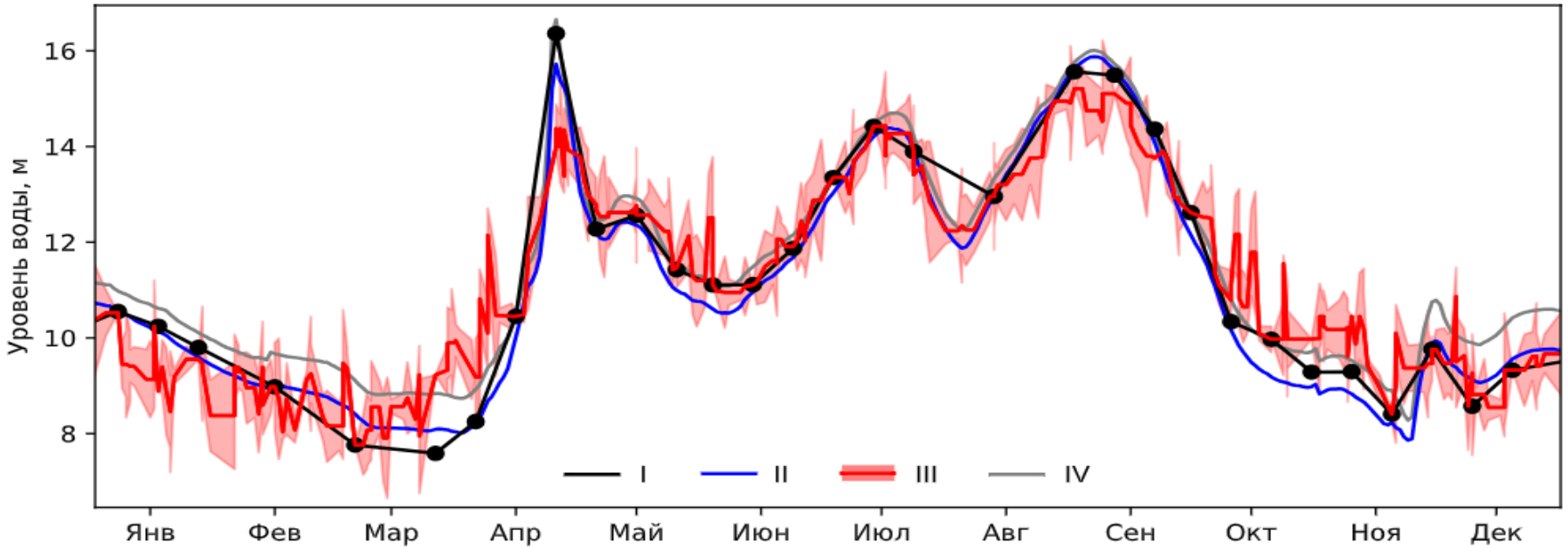
Ежедневные уровни воды на АГП № 1226

Пример синтезированного ряда СВАН-А

Вычисляются:
- Время добегания
- R
- RMSE



Результирующие временные ряды



Сравнение рядов уровня воды на АГП за 2024 г.:
I – измеренные спутником альтиметрии в границах АГП;
II – синтезированные на этапе СВАН-К;
III – синтезированные на этапе СВАН-А и разброс ошибки;
IV – наземные измерения

Оценка результатов

Информация об использованных ГП					СВАН-К		СВАН-А					
							Порог = 300 км			Порог = 400 км		
№	АГП	НГП (тест.)	Р*, км	НГП (опорные)	R	RMSE, м	R	RMSE, м	Ч*, дни	R	RMSE, м	Ч*, дни
1	3438	6001	16	6005	0,98	0,17	0,89	0,69	7	0,88	0,77	5
2	3389	6001	20	6005	0,97	0,28	0,88	0,61	5	0,88	0,61	5
3	702	6005	3	6001, 6010	0,97	0,33	0,92	0,46	5	0,91	0,50	4
4	935	6005	13	6001, 6010	0,96	0,54	0,92	0,87	5	0,91	0,89	4
5	973	6005	20	6001	0,94	0,4	0,92	0,49	6	0,90	0,55	4
6	713	6010	20	6005, 6016	0,94	0,25	0,86	0,62	6	0,87	0,60	5
7	964	6016	3	6010, 6020, 6022	0,93	0,46	0,84	0,76	8	0,85	0,81	4
8	963	6016	15	6020, 6022, 6010, 6024	0,94	0,39	0,83	0,81	14	0,91	0,60	7
9	927	6020	19	6022, 6016, 6024, 6026	0,98	0,42	0,72	0,92	5	0,73	0,93	4
10	955	6024	3	6016, 6020, 6022, 6026	0,99	0,26	0,84	0,52	4	0,81	0,59	3
11	930	6024	15	6016	0,9	0,47	0,81	0,67	4	0,82	0,67	3
12	948	6026	20	6024, 6022	0,96	0,35	0,85	0,59	4	0,85	0,60	3
13	924	6026	15	6024, 6027, 6022, 6020	0,91	0,31	0,82	0,54	4	0,83	0,54	3
14	971	6027	3	6030, 6026, 6024, 6022	0,96	0,35	0,8	0,69	4	0,82	0,70	3
15	701	6030	12	6027, 6026, 6024, 5004	0,9	0,44	0,74	0,84	5	0,6	1,03	2
16	953	5004	20	5008, 5012, 5016	0,89	0,53	0,89	0,68	3	0,89	0,67	2
17	942	5008	6	5004, 5012, 5016	0,97	0,3	0,92	0,54	3	0,91	0,54	2
18	962	5008	10	5004, 5012, 5016	0,97	0,33	0,91	0,56	2	0,91	0,59	2
19	947	5012	12	5004, 5008, 5016	0,98	0,22	0,92	0,56	3	0,91	0,59	2

Информация об использованных ГП					СВАН-К		СВАН-А					
							Порог = 300 км			Порог = 400 км		
№	АГП	НГП (тест.)	Р*, км	НГП (опорные)	R	RMSE, м	R	RMSE, м	Ч*, дни	R	RMSE, м	Ч*, дни
20	1227	5012	20	5004, 5008, 5016	0,98	0,26	0,92	0,58	2	0,91	0,60	2
21	6637	5012	20	5004, 5008, 5016	0,98	0,28	0,92	0,57	3	0,91	0,59	2
22	1232	5016	4	5008, 5012, 5019	0,98	0,28	0,91	0,56	2	0,91	0,56	2
23	1218	5019	5	5012, 5016, 5020	0,93	0,41	0,92	0,47	2	0,91	0,49	2
24	5792	5019	20	5020, 5016, 5012	0,94	0,46	0,92	0,59	2	0,91	0,61	2
25	1247	5020	20	5024, 5019, 5026, 5016	0,97	0,35	0,95	0,59	2	0,94	0,62	2
26	1226	5024	14	5019, 5020, 5026	0,98	0,33	0,96	0,51	2	0,94	0,60	2
27	1240	5026	10	5020, 5024, 5029	0,99	0,28	0,93	0,85	2	0,92	0,91	2
28	6639	5026	6	5020, 5024, 5029	0,99	0,38	0,93	0,82	2	0,92	0,90	2
29	1223	5029	19	5024, 5026	0,97	0,41	0,92	0,71	2	0,92	0,72	2
30	1259	5029	15	5020, 5024, 5026	0,96	0,49	0,92	0,66	2	0,91	0,69	2
31	1243	5029	20	5026, 5031, 5033, 5024	0,96	0,51	0,92	0,70	2	0,92	0,71	2
32	1229	5031	6	5029, 5033	0,98	0,45	0,96	0,57	3	0,96	0,56	2
33	7488	5031	15	5029, 5033, 5026, 5805	0,98	0,36	0,95	0,68	2	0,95	0,67	2
34	1765	5031	20	5033, 5029, 5026, 5805	0,97	0,39	0,96	0,64	2	0,96	0,62	2
35	1254	5033	8	5031	0,95	0,56	0,95	0,55	3	0,96	0,52	2
36	1762	5033	20	5031, 5029, 5805	0,98	0,37	0,95	0,66	3	0,96	0,64	2
37	1234	5805	16	5029, 5031, 5033	0,84	0,45	0,89	0,49	3	0,89	0,48	3
38	1235	5805	20	5029, 5031, 5033	0,92	0,33	0,88	0,51	3	0,89	0,50	3

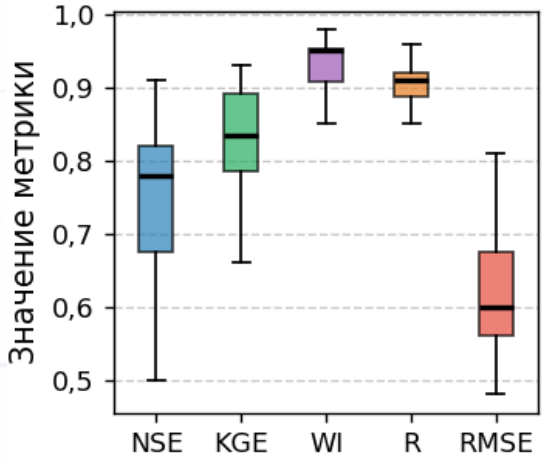
Р* – Расстояние АГП-НГП;

Ч* – частота (среднее количество дней между измерениями)

Оценка результатов

Использованные метрики:

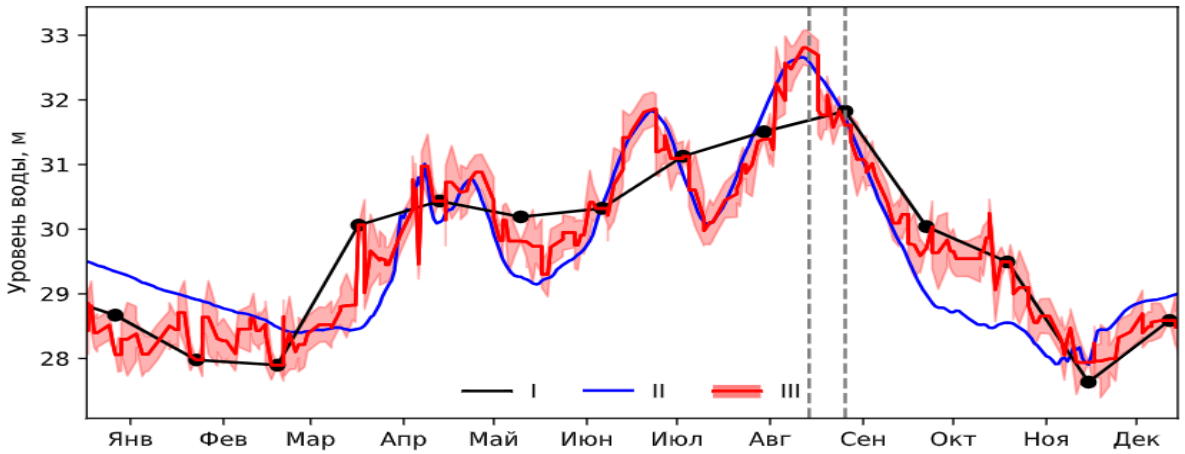
- коэффициент корреляции Пирсона (*R*),
- коэффициент Нэша-Сатклиффа (*NSE*),
- критерий Клинга-Гупта (*KGE*),
- индекс Уилмотта (*WI*) и
- среднеквадратическая ошибка (R*MSE*)



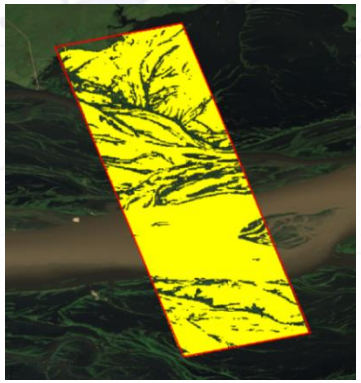
Средние значения
R = 0,89
WI = 0,92
NSE = 0,68
KGE = 0,77
RMSE =0,65 м.

Оценка метода: размах метрик, характеризующих точность восстановленных значений на 38 тестовых АГП. *NSE*, *KGE*, *WI*, *R* – безразмерные величины, *RMSE* – в метрах

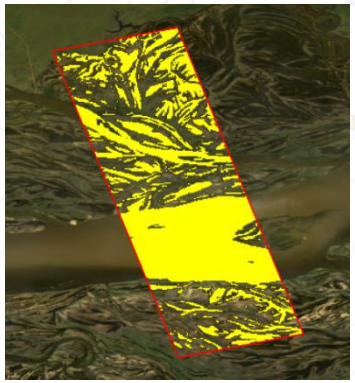
Косвенная оценка на участках, не охваченных наземными наблюдениями



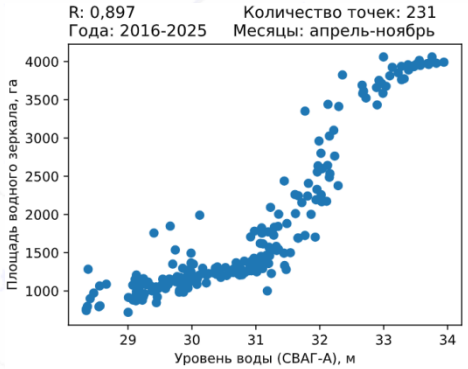
Сравнение рядов уровня воды на АГП № 1250 за 2024 г.:
I – измеренные спутником альтиметрии в границах АГП;
II – синтезированные на этапе СВАН-К;
III – синтезированные на этапе СВАН-А и разброс ошибки;
пунктирными линиями обозначены даты оптической съёмки



28.08.2024 02:02:53
MSI BOA
Sentinel-2A



09.09.2024 01:49:13
OLI-TIRS BOA
Landsat 8



связь уровней воды и площади водного зеркала

Изменение площади водного зеркала. Красным полигоном заданы границы АГП № 1250, жёлтые области соответствуют маске воды в границах АГП.

Результирующая частота

Количество измерений уровня воды в месяц для разных периодов времени
*Даты соответствуют старту проведения измерений соответствующим спутником

Период времени*	Действующие спутники	Количество синтезированных уровней в месяц	
		Среднее	Макс.
01.04.2016 –21.11.2018	Sentinel-3A	7	12
21.11.2018 – 17.12.2020	Sentinel-3A/-3B	13	21
17.12.2020 – н.в.	Sentinel-3A/-3B/-6A	15	26

Выводы

- Разработан двухэтапный метод синтезирования высокочастотных альтиметрических гидрографов для участков рек, не охваченных наземными наблюдениями.
- Анализ сопоставления полученных рядов на 38 АГП с архивами наземных измерений позволил оценить результаты применения метода для реки Амур:
  - **При наличии данных от опорных НГП (СВАН-К)**: формируются ежедневные ряды данных. R=0,96, RMSE=0,37 м.
  - **При отсутствии таких данных (СВАН-А):** формируются ряды с информацией об уровне воды примерно раз в 3 дня. R=0,89, RMSE=0,65 м.

- Таким образом, метод подтвердил свою эффективность, а следовательно в силу доступности данных архивных наземных измерений и оперативных альтиметрических, метод может быть применён и для других рек.



Спасибо за внимание

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки (тема «Мониторинг», госрегистрация № 126031818938-6) с использованием ресурсов ЦКП «ИКИ-Мониторинг», включая возможности и инструментарий информационной системы «Вега-Гидро».