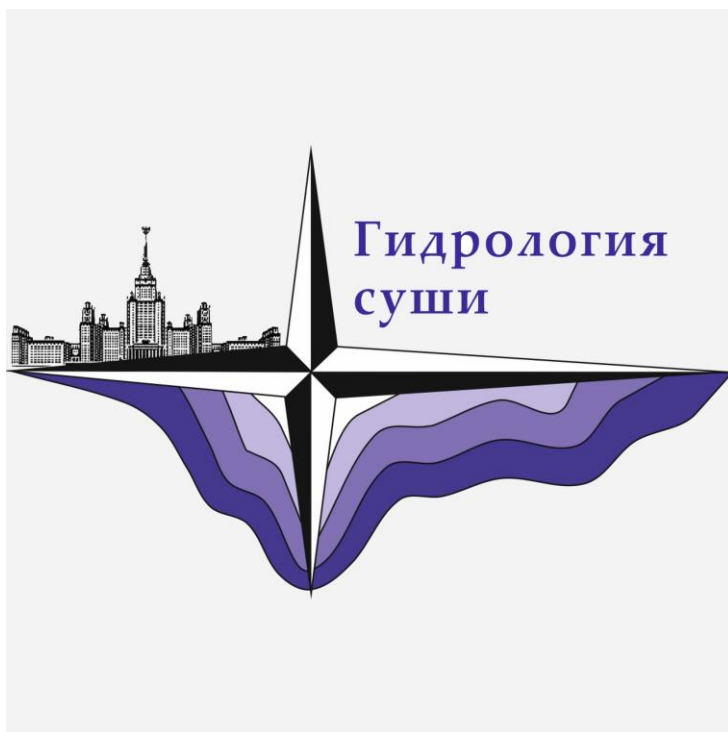


XXII международная конференция "СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ  
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА"

# Новейшие спутниковые технологии в задачах гидродинамического моделирования

Филатов Е.А., Крыленко И.Н., Захарова Е.А



# Цель и задачи:

**Цель:** Совместное применение методов численного моделирования и данных дистанционного зондирования для исследования уровня рек в условиях нехватки фактических данных.

## Задачи:

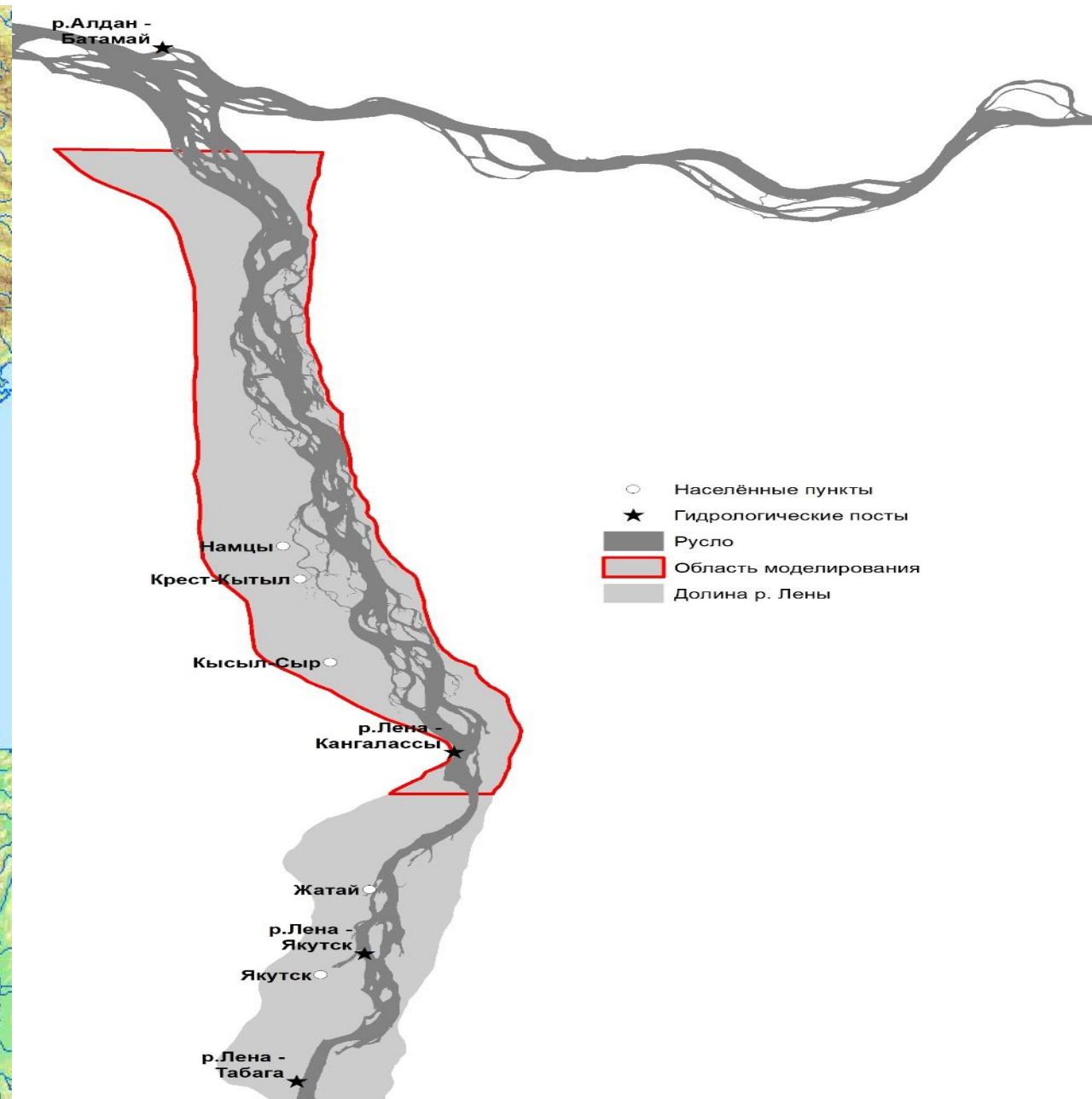
- Сбор исходных данных для численного моделирования
- Калибровка гидродинамической модели на заданный участок
- Сбор и обработка дистанционных данных
- Сравнение результатов численного моделирования с данными спутниковой альтиметрии (местные уклоны, фактические отметки уровня воды)
- Сравнение результатов численного моделирования с дистанционными данными о границах затопления

# Объект исследования

- Среднее течение реки Лены



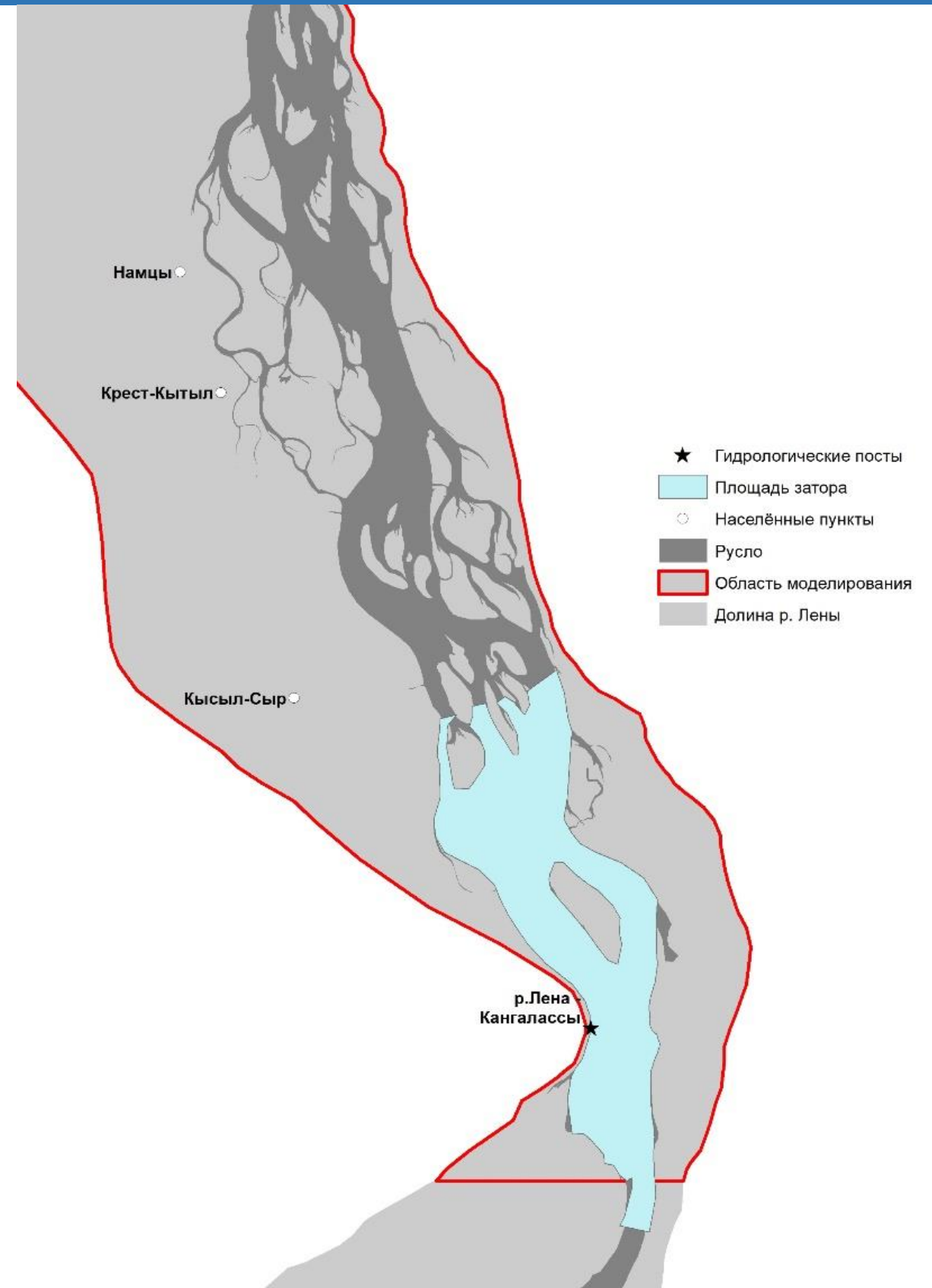
Водосбор поста с данными о расходе воды



Исследуемый участок

# Исходные данные

- Спутниковые данные
  - ЦМР(FABDEM)
  - Альтиметрические данные
    - Sentinel-3A
    - Sentinel-3B
    - JasonCS(Sentinel-6) (с 2021)
    - IceSat2
- Наземные данные
  - Промеры и интерполяция глубин
  - Данные гидрологических постов
    - Уровни
    - Расходы
    - Ледовые явления



# Моделирование характеристик затопления

## STREAM\_2D и STREAM\_2D CUDA

с ледовым блоком (В.В. Беликов, А.И. Алексюк )

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0, \\ \frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial\left(hu^2 + \frac{1}{2}gh^2\right)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -gh \frac{\partial b'}{\partial x} + \frac{\tau_1^b + \tau_1^i}{\rho}, \\ \frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial\left(hv^2 + \frac{1}{2}gh^2\right)}{\partial y} = -gh \frac{\partial b'}{\partial y} + \frac{\tau_2^b + \tau_2^i}{\rho}. \end{array} \right.$$

где  $(x, y)$  и  $t$  координаты и время;

$u(x, y, t)$ ,  $v(x, y, t)$  осредненные по вертикали компоненты скорости

$h(x, y, t)$  глубина;

$b' = b + \rho_i H / \rho$ , где  $b$  отметки дна;  $\rho$  и  $\rho_i$  плотность воды и льда,  $H$  – толщина льда;

$(\tau_1^b, \tau_2^b)$  и  $(\tau_1^i, \tau_2^i)$  -касательные напряжения на поверхности дна и льда;

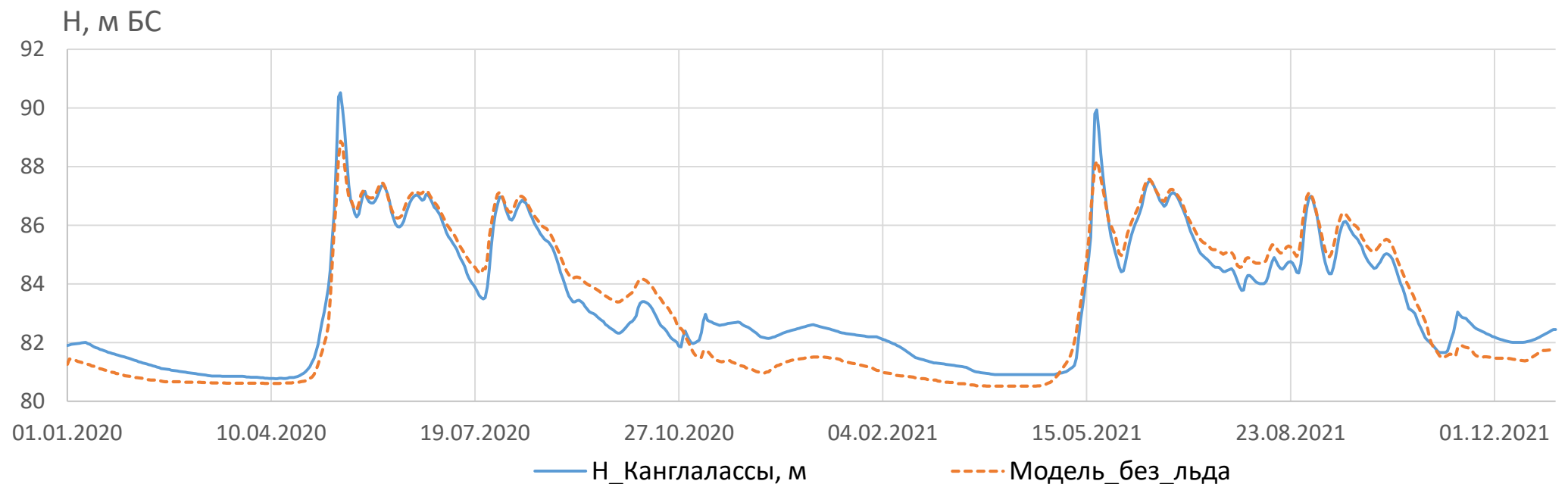
$g$  – ускорение свободного падения.

# Калибровка гидродинамической модели

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (H_{f(i)} - H_{sim(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (H_{f(i)} - \overline{H_f})^2}$$

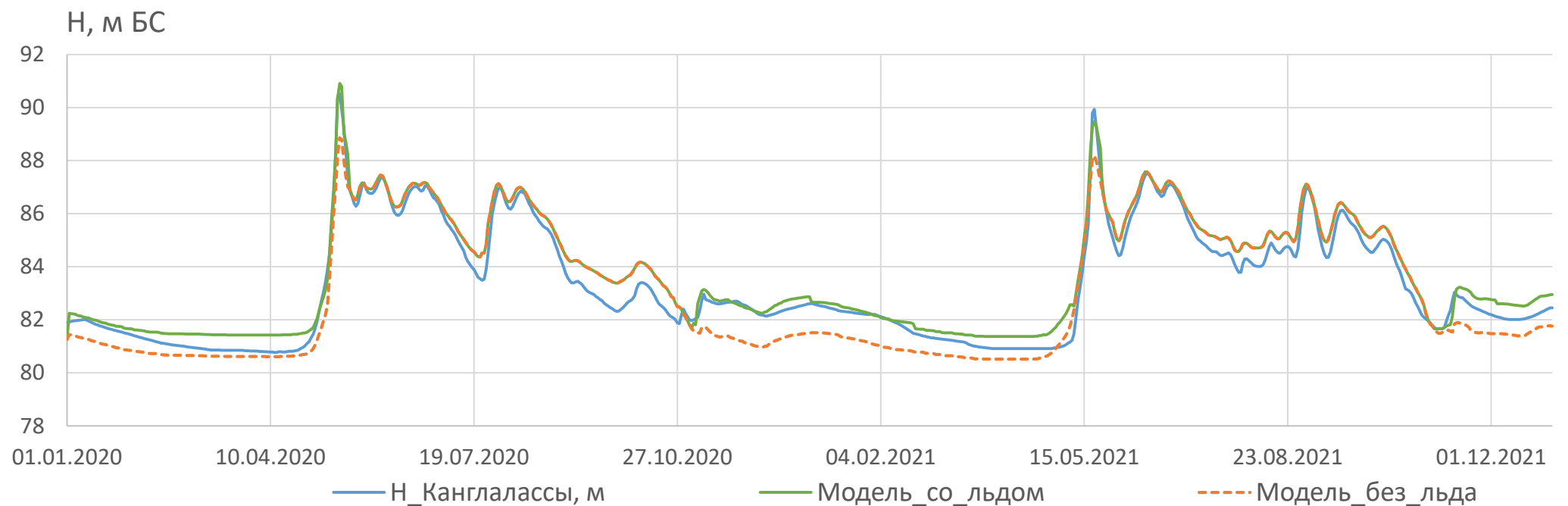
$NSE(\lambda) = 0,75$

$NSE = 0,85$



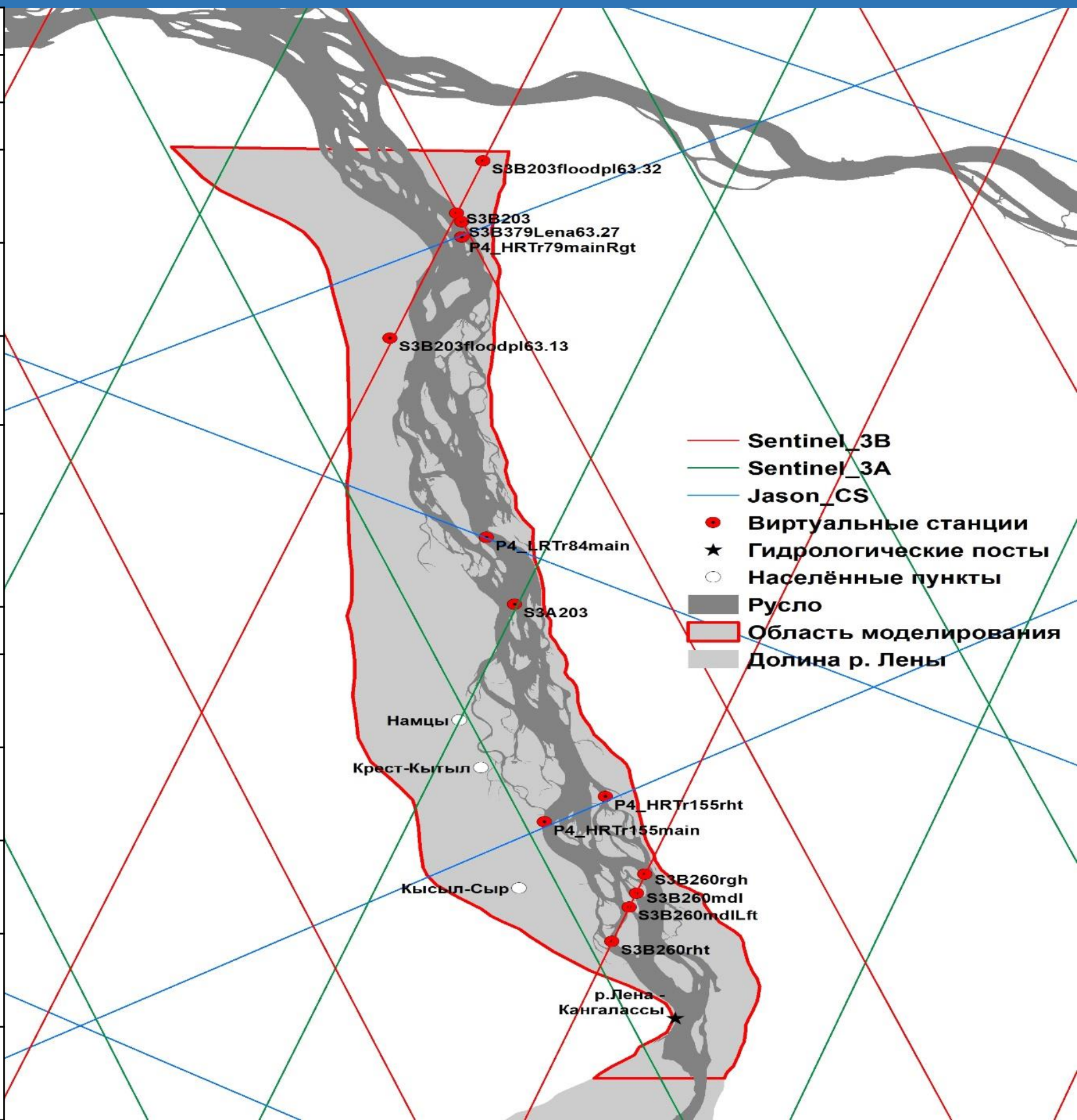
$NSE(\lambda) = 0,90$

$NSE = 0,95$



# Виртуальные станции наблюдения за уровнем воды

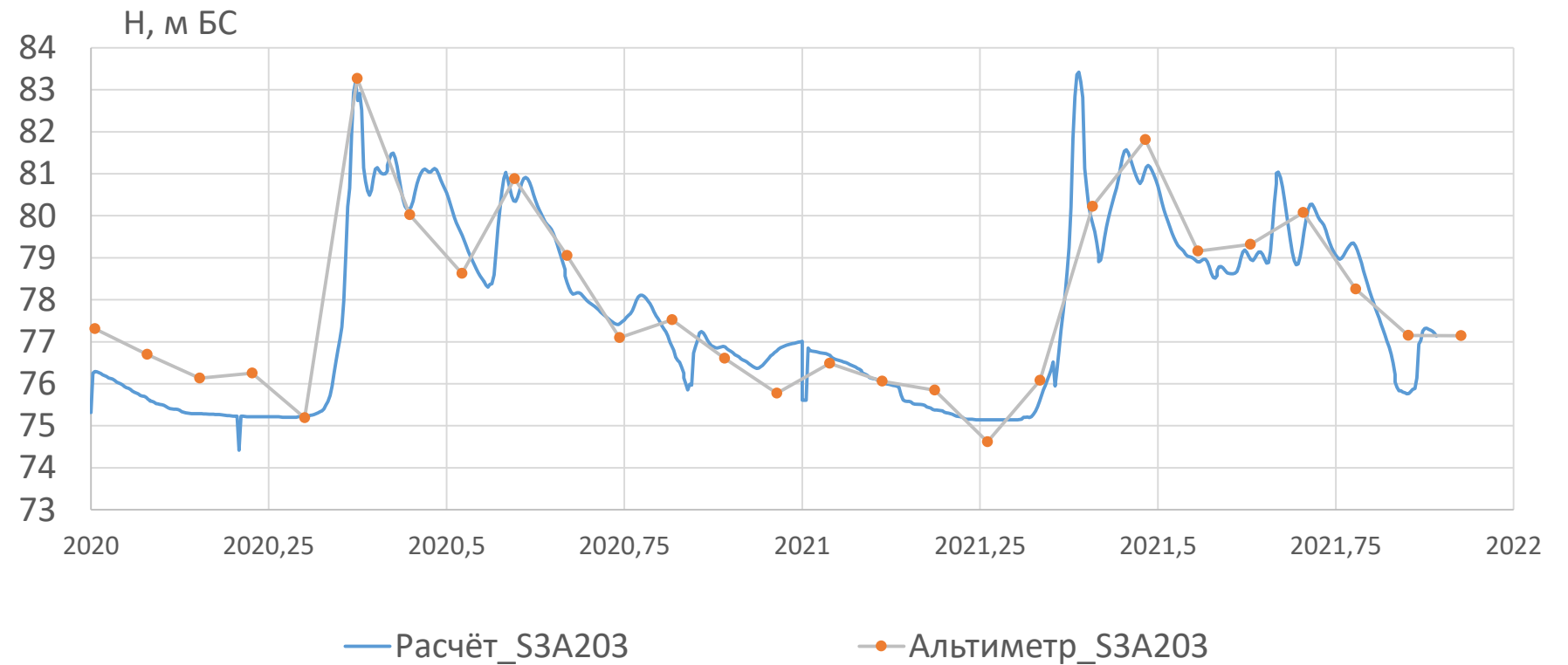
Название	Широта	Долгота
S3A203	62,847	129,766
S3B203	63,283	129,673
S3B203floodpl 63.32	63,341	129,722
S3B203floodpl 63.13	63,145	129,549
S3B260rgh	62,544	129,989
S3B260mdl	62,523	129,974
S3B260mdlLft	62,508	129,961
S3B260rht	62,470	129,929
S3B379Lena 63.27	63,274	129,682
P4_HRTr 155main	62,604	129,813
P4_HRTr 155rht	62,631	129,923
P4_HRTr 79mainRgt	63,257	129,682
P4_LRTr 84main	62,921	129,718



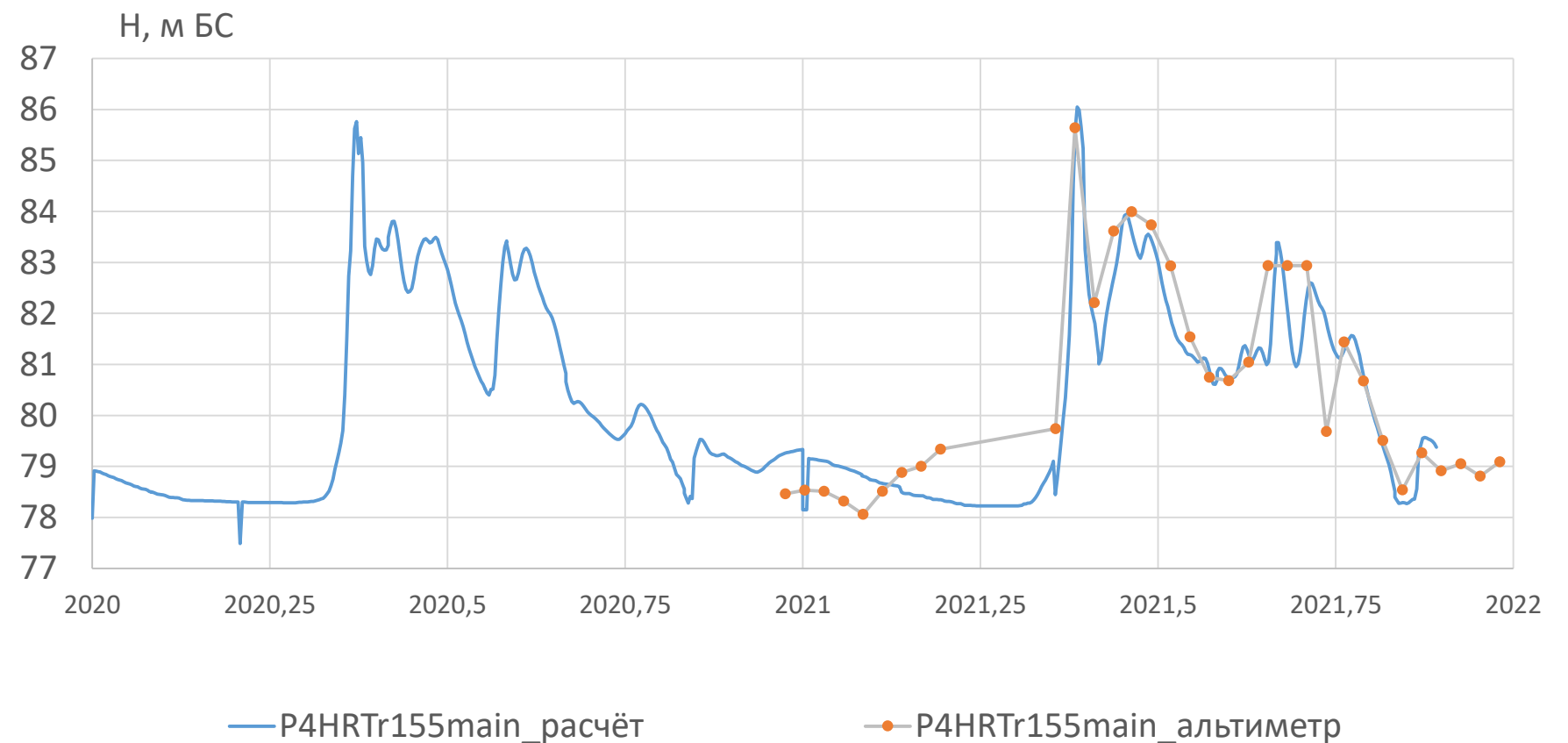
- Sentinel\_3B
- Sentinel\_3A
- Jason\_CS
- Виртуальные станции
- ★ Гидрологические посты
- Населённые пункты
- Русло
- ▭ Область моделирования
- Долина р. Лены

# Сравнение хода уровней по расчёту и альтиметрии

Sentinel-3A



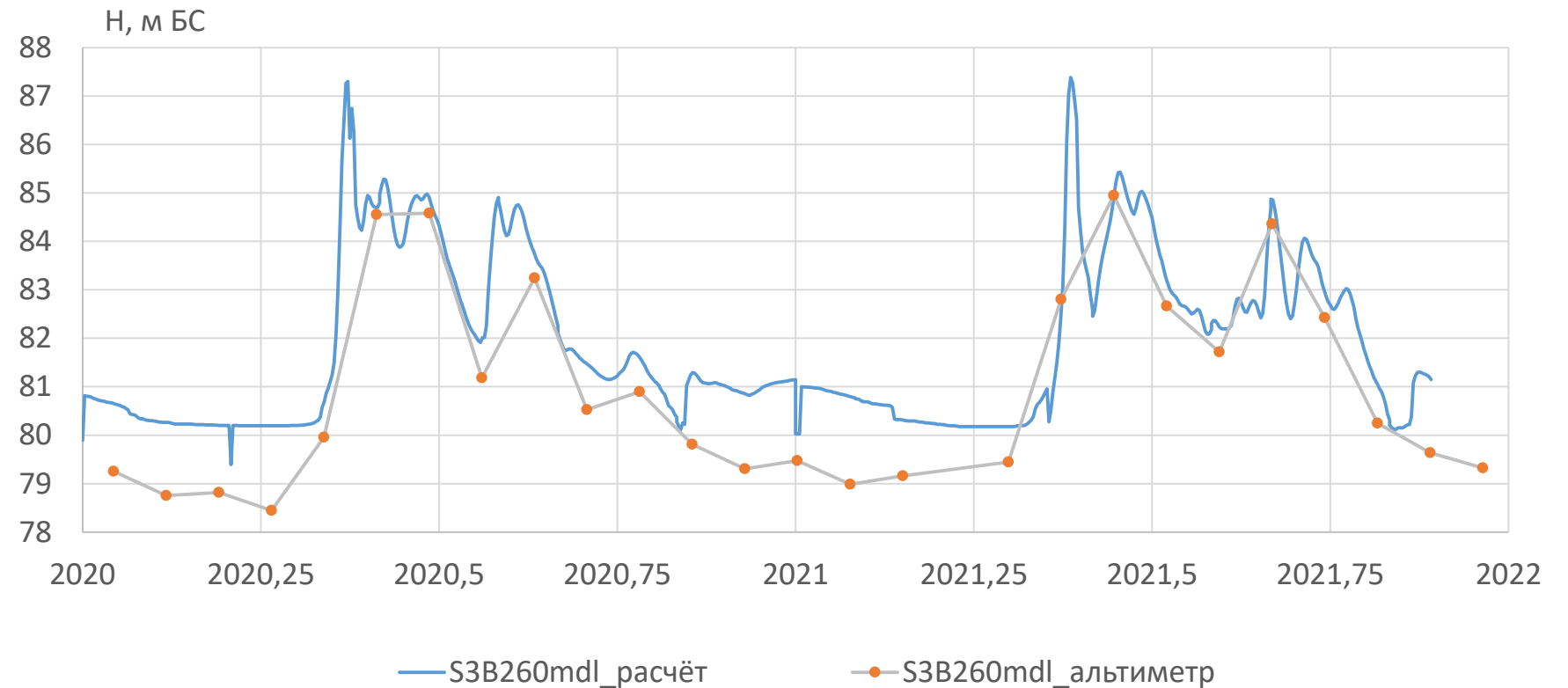
JasonCS(Sentinel-6)



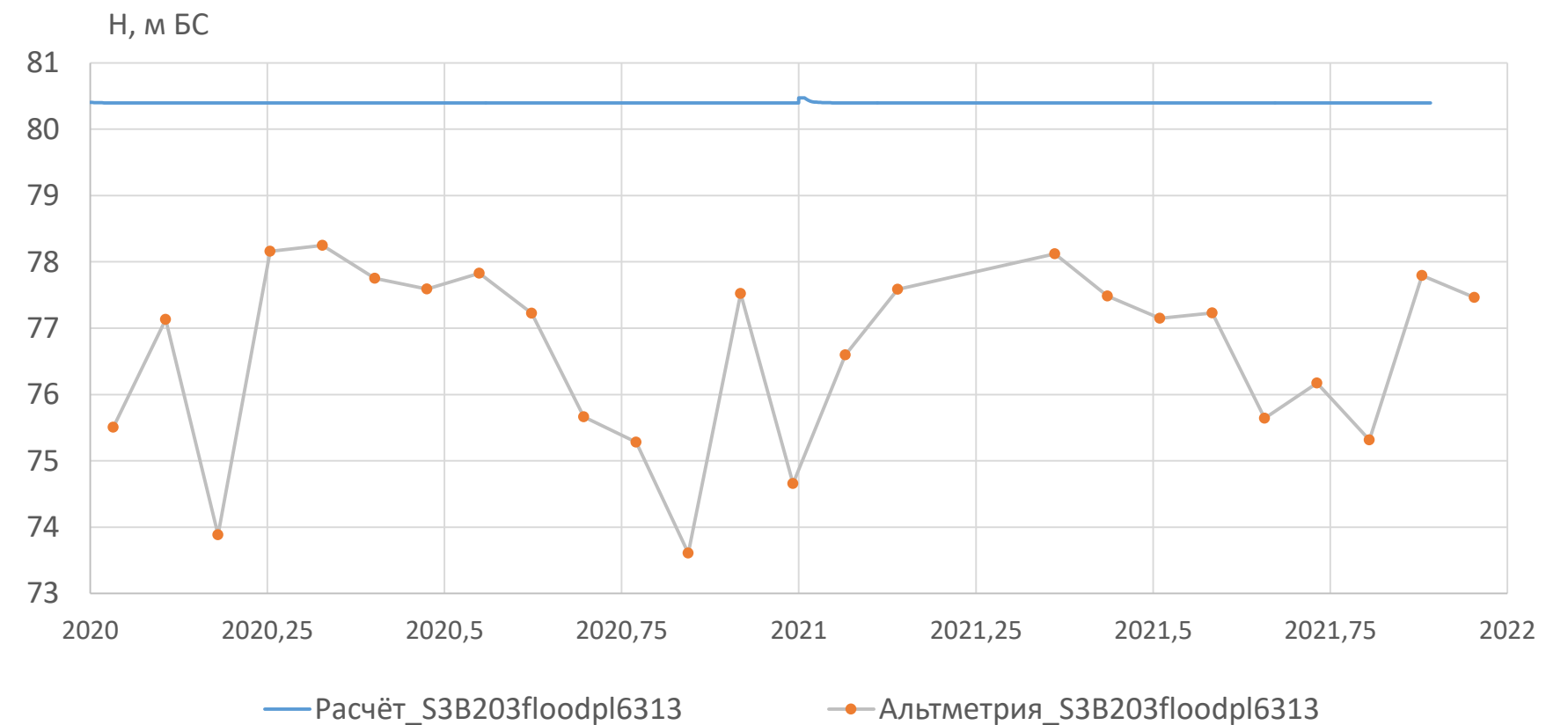


# Сравнение хода уровней по расчёту и альтиметрии

Sentinel-3B (русло)



Sentinel-3B (пойма)



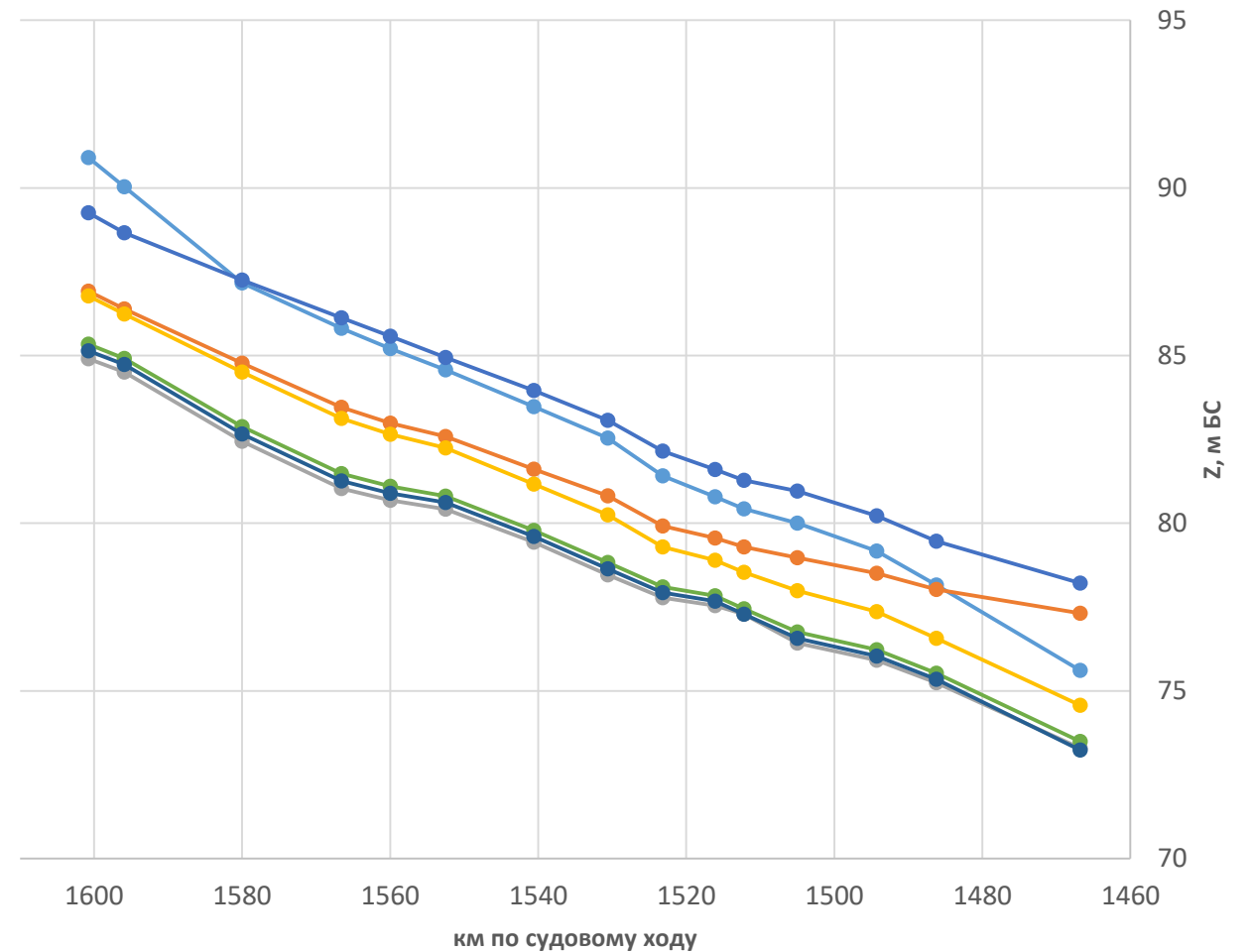
# Сравнение хода уровней по расчёту и альтиметрии

Спутник	Виртуальная станция	Период открытой воды				Период ледовых явлений			
		<i>Rmse</i>	<i>A</i>	<i>R</i>	<i>N</i>	<i>Rmse</i>	<i>A</i>	<i>R</i>	<i>N</i>
Sentinel-3A	S3A203	0,57	0,52	0,94	12	0,75	0,62	0,57	15
Sentinel-3B	S3B203	0,85	0,60	0,93	10	0,66	0,53	0,64	15
	S3B260rgh	2,74	1,88	0,44	11	3,26	2,40	0,43	15
	S3B260mdl	0,54	0,49	1,00	11	1,35	1,30	0,92	15
	S3B260mdlLeft	0,39	0,34	0,99	11	1,40	1,20	0,85	14
	S3B379Lena6327	0,63	0,54	0,86	10	0,75	0,63	0,93	15
	S3B260rht	0,41	0,29	0,99	11	0,93	0,81	0,82	13
<u>JasonCS</u> (Sentinel-6)	P4HRTr155main	0,86	0,65	0,85	16	0,47	0,38	0,42	17
	P4HRTr155rht	0,18	0,13	0,99	5	1,58	1,32	-0,05	9
	P4_HRTr79mainRgt	0,59	0,54	0,72	12	1,44	1,10	0,21	22
	P4_HRTr84main	0,98	0,56	0,61	12	0,47	0,35	0,82	22

*Rmse* – среднеквадратическая ошибка, *A* – среднее расхождение, *R* – коэффициент корреляции, *N* – количество точек наблюдений альтиметра

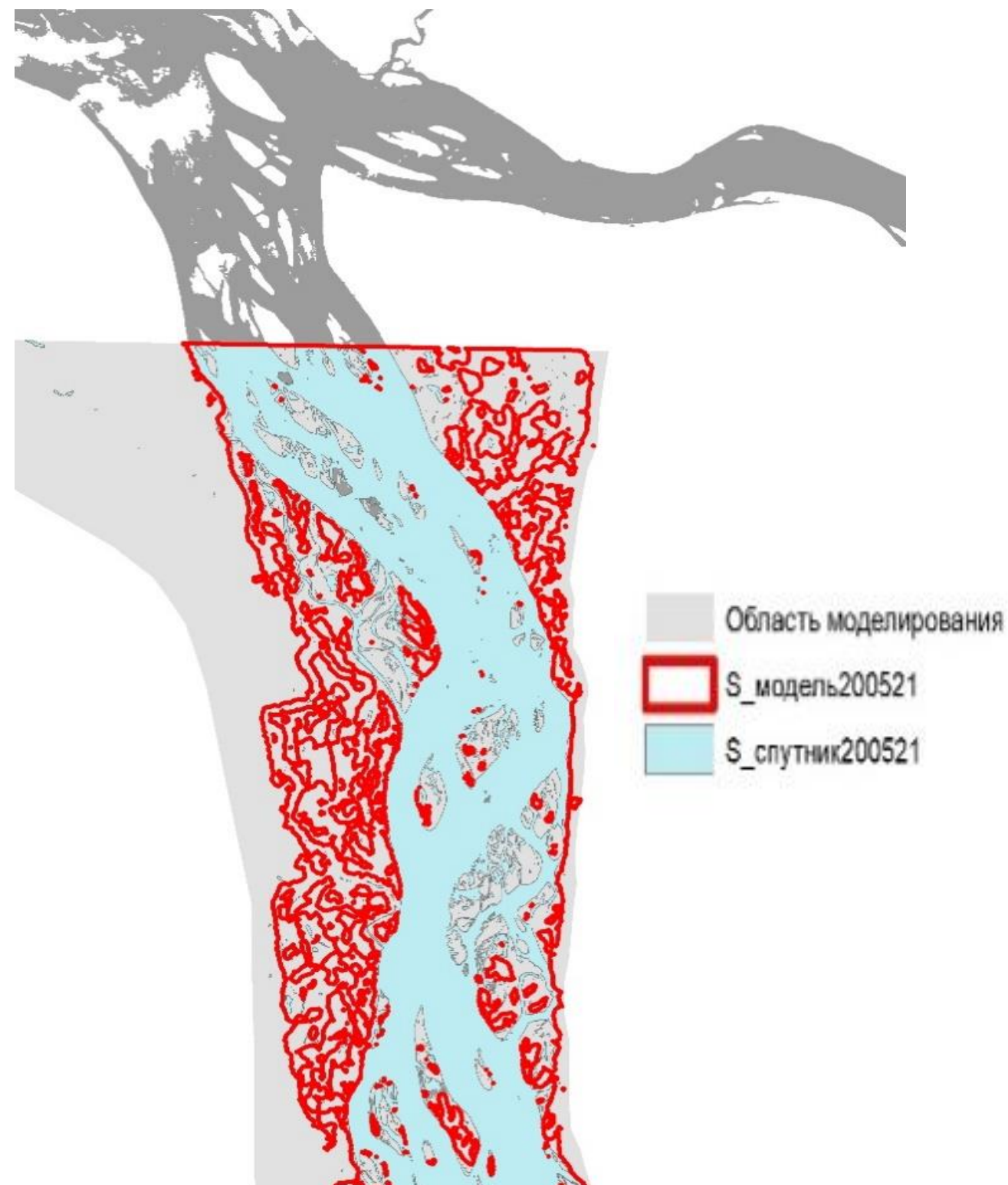
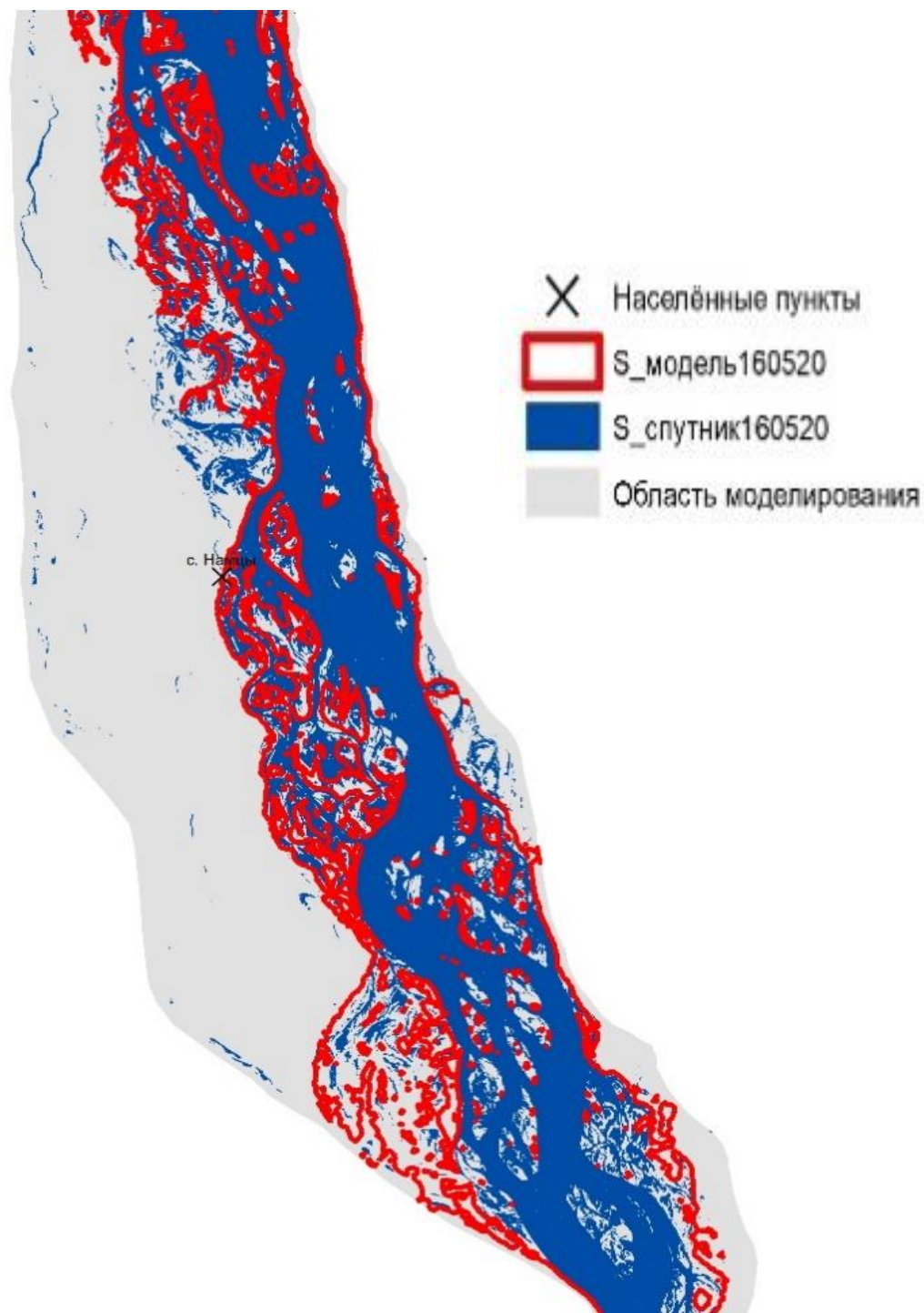
# Сравнение уклонов водной поверхности по расчёту и альтиметрии

Дата	Широта	Долгота	Уклон спутник, см/км	Уклон модель, см/км	Расхождение, см/км
18.07.2021	62,56	129,88	17,70	10.4	7.3
18.07.2021	62,64	129,83	7,90	5.6	2.3
18.07.2021	62,76	129,80	13,80	8.5	5.3
18.07.2021	62,56	129,88	9,60	10.4	-0.8
18.07.2021	62,71	129,85	13,20	8.5	4.7
18.07.2021	62,79	129,80	10,80	8.5	2.3
19.05.2020	62,34	130,09	30,60	10.9	19.7
19.05.2020	62,40	130,04	3,20	10.1	-6.9
19.05.2020	62,53	130,00	12,20	9.9	2.3
18.08.2020	62,36	130,06	13,80	11.1	2.7
18.08.2020	62,42	130,01	11,70	10.9	0.8
18.08.2020	62,55	129,98	12,40	10.3	2.1
13.07.2021	63,33	129,58	8,60	10.5	-1.9
13.07.2021	63,29	129,65	11,80	10.5	1.3
13.07.2021	63,33	129,58	8,10	10.5	-2.4
13.07.2021	63,29	129,65	11,80	10.5	1.3
23.05.2020	63,32	129,61	9,10	3.7	5.4
21.05.2021	63,33	129,54	10,80	6.4	4.4
15.07.2020	63,33	129,55	9,60	10.1	-0.5
15.07.2020	63,32	129,61	52,10	10.1	42.1
15.07.2020	63,26	129,69	30,00	10.1	20.0
13.07.2021	63,34	129,51	10,80	10.5	0.3
13.07.2021	63,33	129,58	9,70	10.5	-0.8
13.07.2021	63,29	129,65	10,20	10.5	-0.3



—●— 14.05.2020 —●— 19.05.2020 —●— 15.07.2020 —●— 08.08.2020 —●— 21.05.2021 —●— 13.07.2021 —●— 18.07.2021

# Сравнение зон затопления по данным ДДЗ и по результатам моделирования



# Сравнение зон затопления по данным ДДЗ и по результатам моделирования

Дата	Q, м <sup>3</sup> /с	S_спутник, км <sup>2</sup>	S_модель, км <sup>2</sup>	Расхождение, %
16.05.2020	31100	825	975	18
17.05.2020	26500	615	953	55
20.05.2021	33500	728	990	36

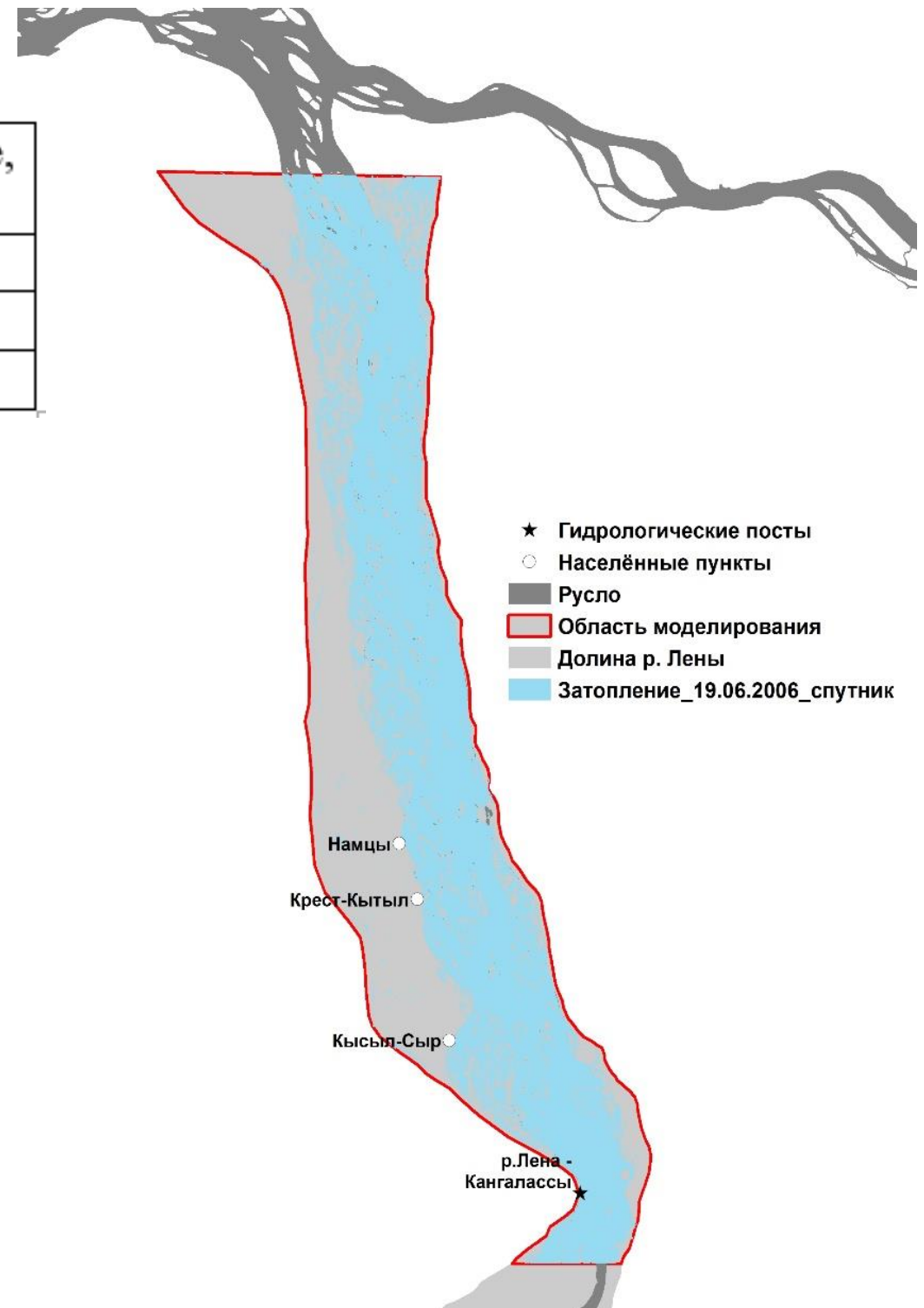
## Причины неточностей

(при  $Q < 40000$ ):

Облачность

Затопленные кустарники

Подпорное влияние



# Выводы:

1. NSE модели по уровню за 2020-2021гг. составил 0,95.
2. Высокий коэффициент корреляции между данными расчёта и альтиметрии, для Sentinel-3B:  
 $R_{\text{ср}} = 0,95$ ;  $A(\text{ср.расхождение}) = 45 \text{ см}$
3. Возможное использование альтиметрии и модели для расчёта уклонов водной поверхности. Среднее расхождение = 1.4 см/км (при среднем уклоне реки на исследуемом участке в период открытой воды 8-10 см/км).
4. Индекс mNDWI не всегда позволяет точно определить поверхность воды, стоит учитывать локальные факторы

Спасибо за внимание!