

# Исследование гидрологического режима реки Анадырь дистанционными методами при недостаточности данных

Школьный Д.И.<sup>1</sup>, Бахарева Е.И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия

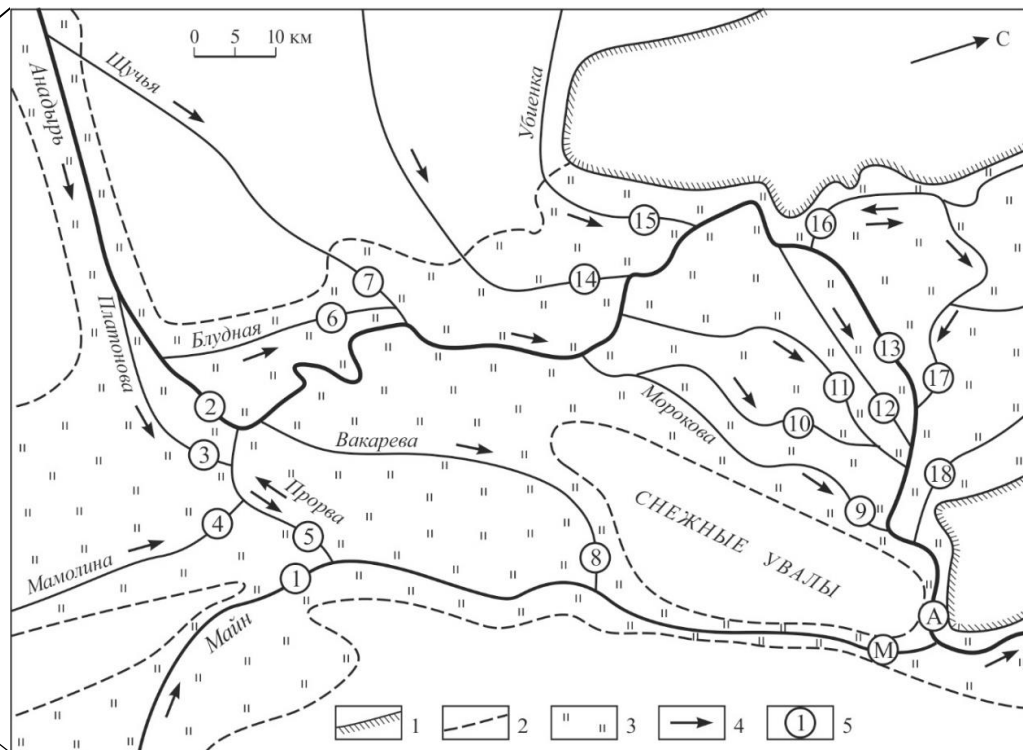
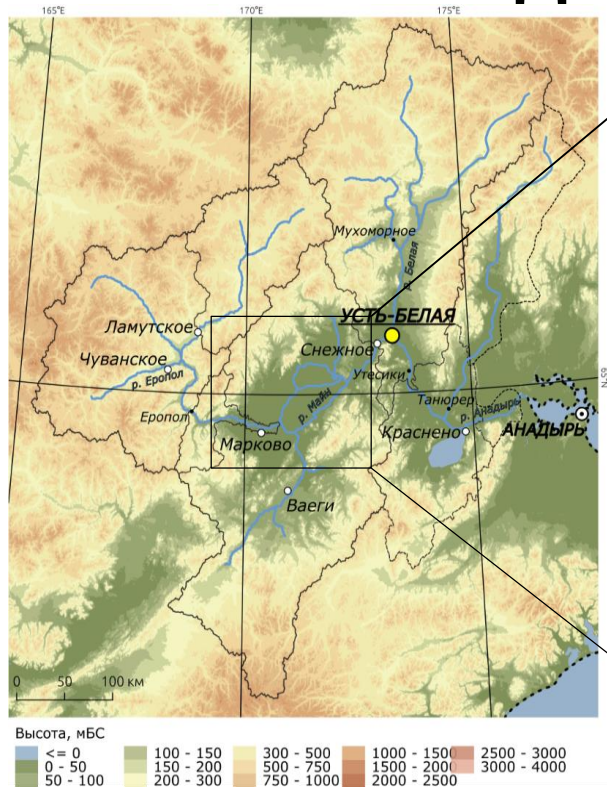
<sup>2</sup>ООО «ИГИИС», Москва, Россия

# Как мы туда попали?



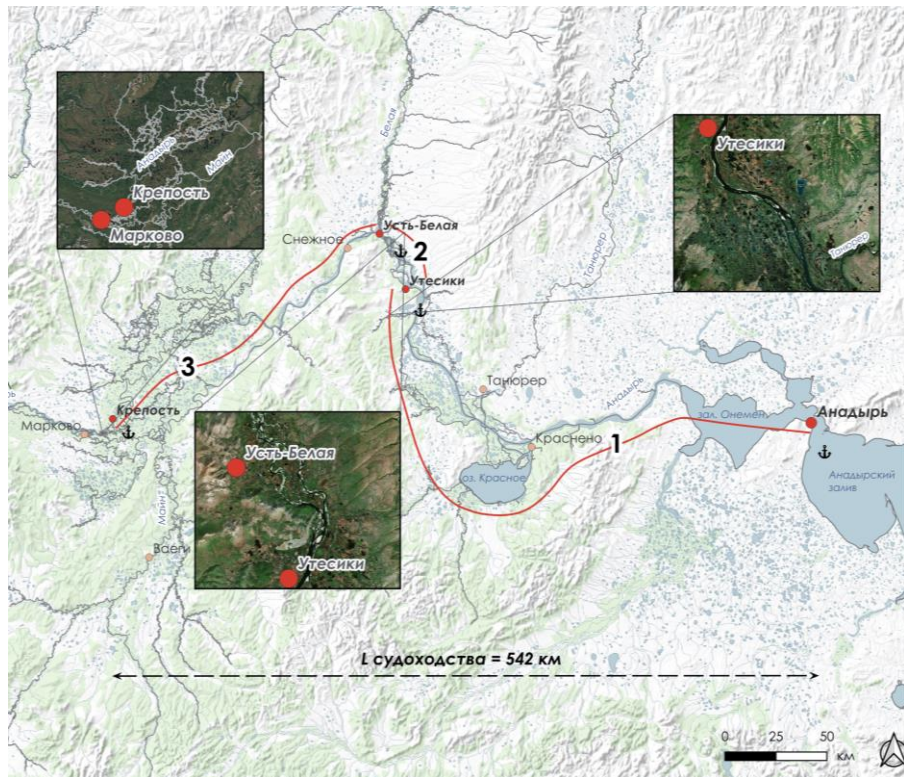
# Объект исследования

Работа выполнена по проекту РФФ 24-27-00149  
«Морфодинамика русла реки Анадырь в условиях гидроклиматических изменений и мерзлотных процессов»

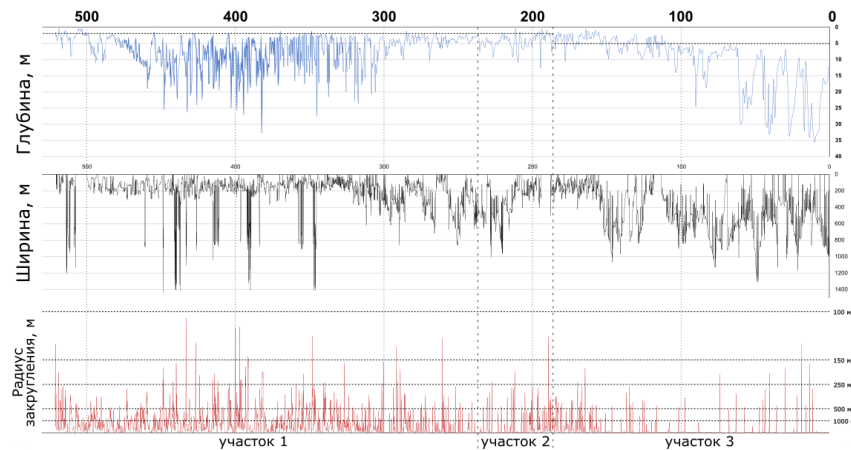


Бассейн р. Анадырь (слева) и схема Анадыро-Майнского разветвления (справа)

# Особенности судоходства



Бассейн р. Анадырь с выделением судоходных участков



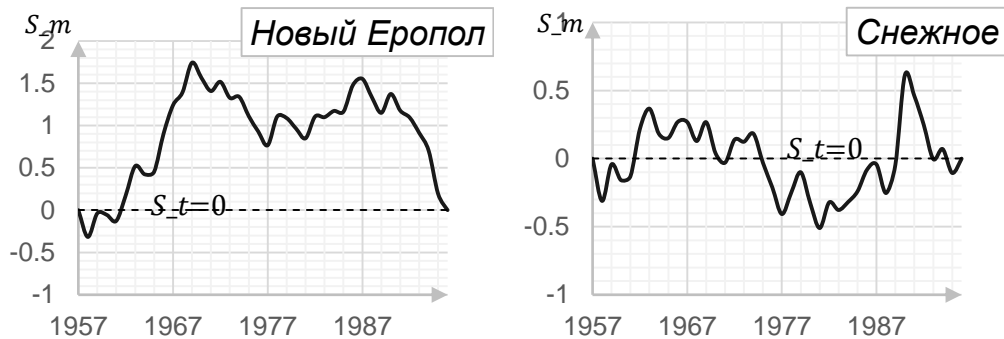
Деформационная схема русла реки Анадырь с 1969 по 2022 гг.



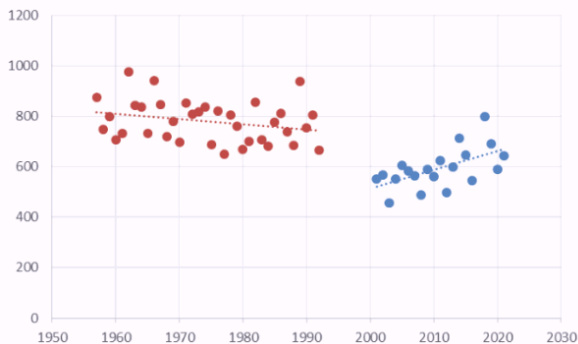
Судоходные характеристики р. Анадырь

# Современная водность и климат

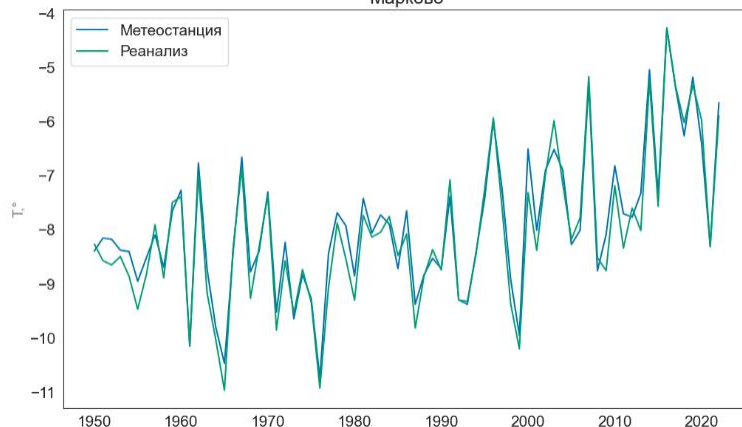
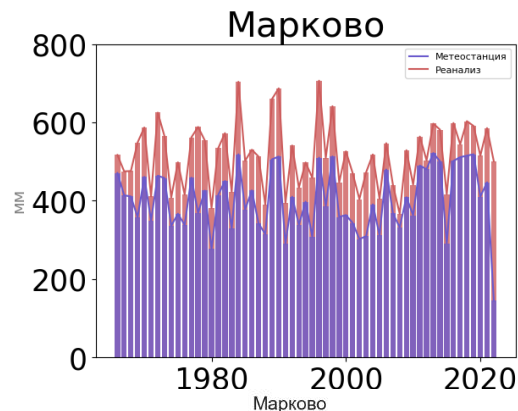
Данные о расходах р. Анадырь отсутствуют, начиная с 90-х годов



Разностно-интегральные кривые среднегодовых расходов воды р.Анадырь



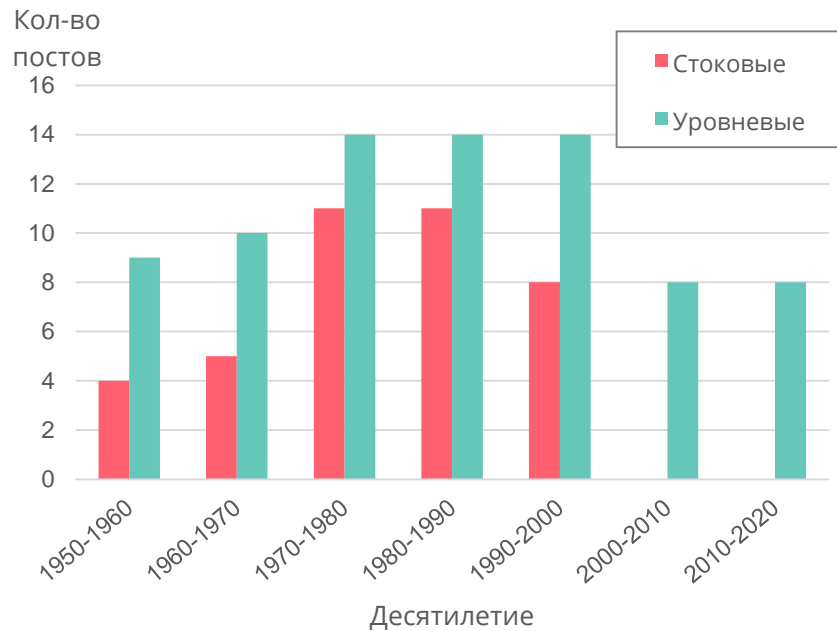
Максимальные уровни на постах **Снежное** и **Усть-Белая**



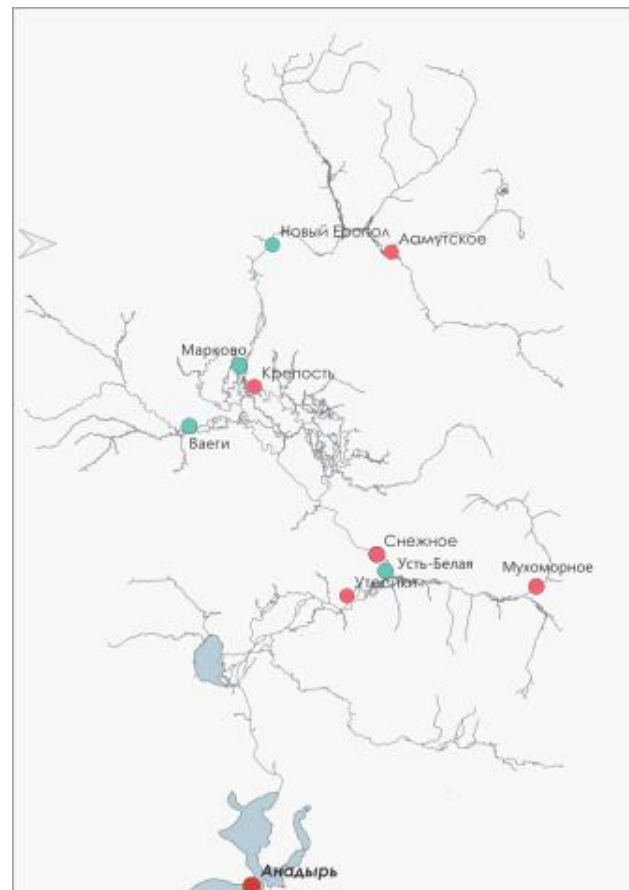
Среднегодовые суммы осадков (сверху) и среднегодовые температуры воздуха (снизу) наблюдаемых и смоделированных значений ERA-5 [1] в период с 1950 по 2022 гг. для метеостанции Марково

1. ERA5-Land Description [электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://climate.copernicus.eu/climate-reanalysis> (Дата обращения 01.05.2023).

# Гидрологическая изученность

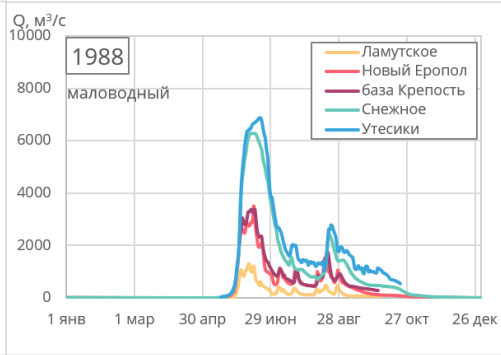
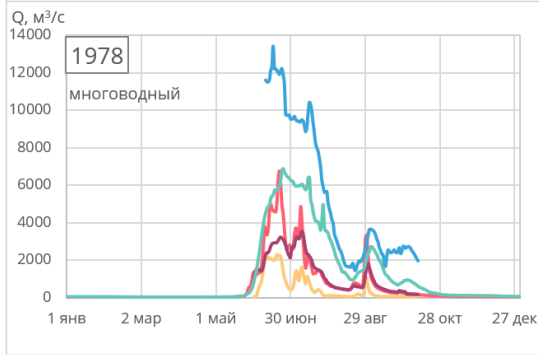
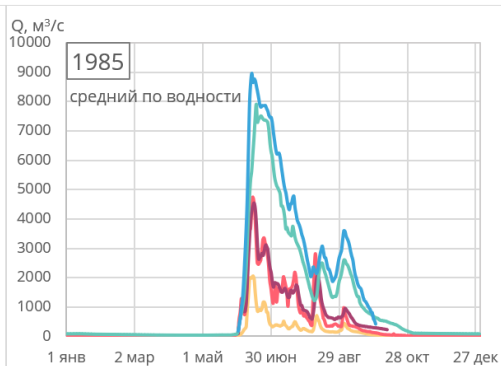
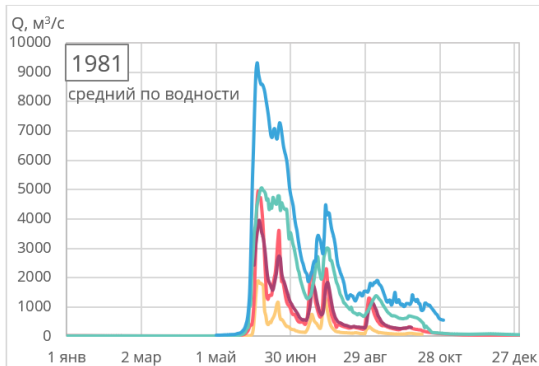


Многолетнее изменение действующих постов в пределах бассейна р. Анадырь



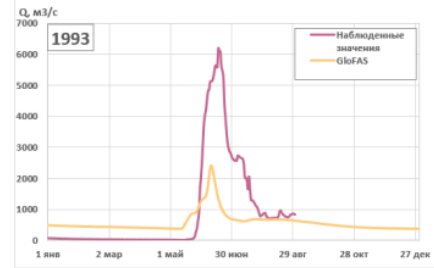
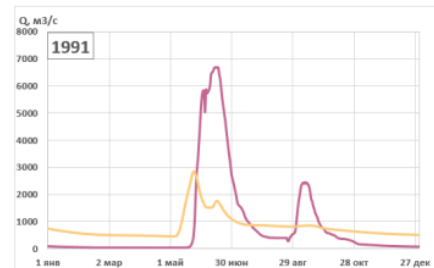
Опорные посты в бассейне

# Гидрометеорологическая характеристика



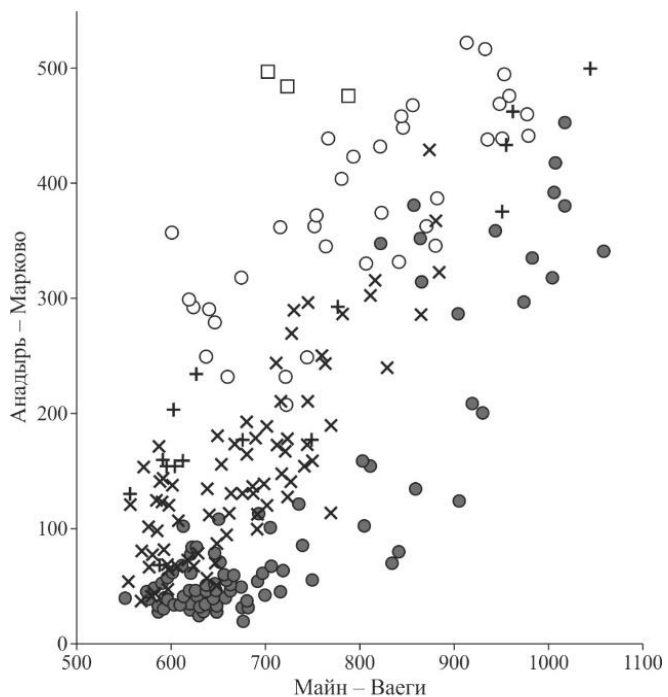
Ежедневные расходы воды для периодов одновременной работы 5 гидрологических постов на р. Анадырь

**Основная фаза водного режима – летнее половодье, начинающееся в июне**  
**Летне-осенняя межень прерывается дождевыми паводками**  
**Зимняя межень характеризуется низким стоком**

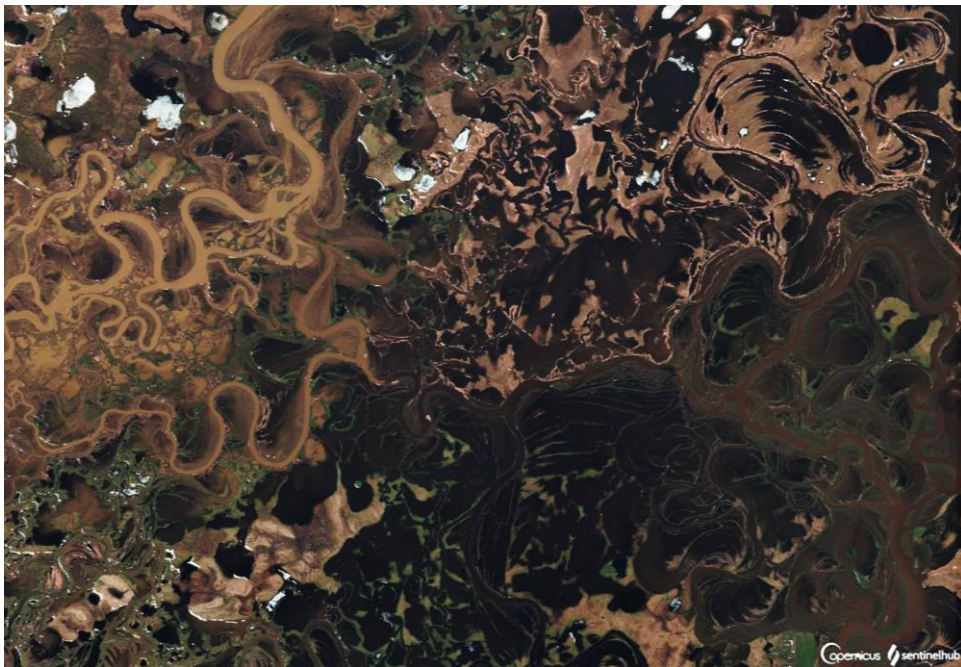


Реанализ vs наблюдения

# Реверсивное течение в узле слияния



□ 1    ○ 2    + 3    × 4    ● 5  
Направление потока в системе Анадырь-Прорва-Майн: : 1 - из Анадыря в Майн; 2 - из Анадыря по протоке Платоновой в Майн; 3 - образование "запора"; 4 - из р. Мамолиной в обоих направлениях; 5 - из Майна в Анадырь



Узел слияния р. Майн, р. Анадырь и р.Мамолиной в половодье

В XVIII веке, по историческим свидетельствам, протока Прорва текла из Майна в Анадырь.

К настоящему моменту это происходит только в глубокую межень



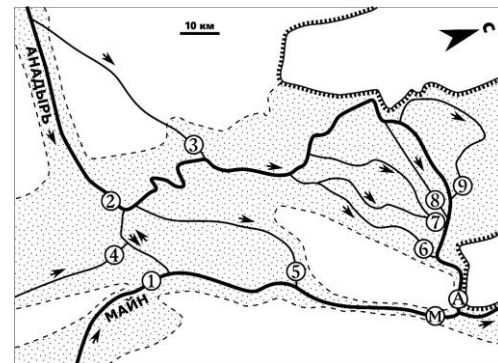
# Полевые данные 2021 и 2022 гг.:

Хлорофилл (Chl a) - инфракрасный канал [2,3]

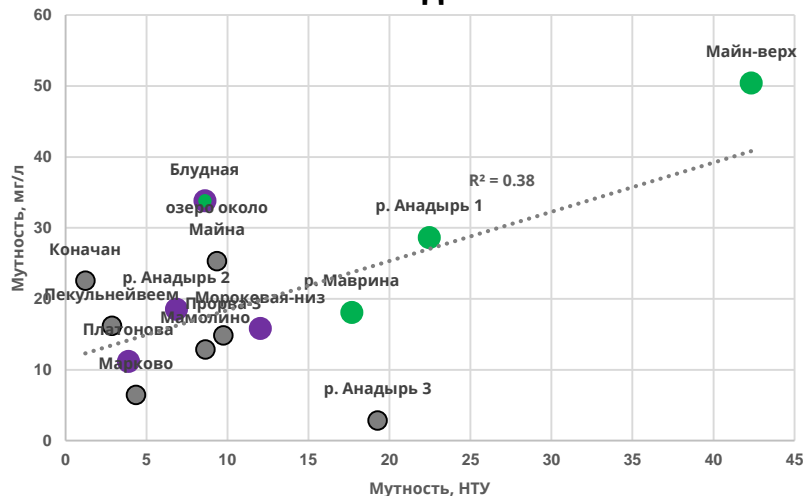
CDOM (окрашенное растворенное ВВ) –

отношение зеленого и красного каналов [3,4]

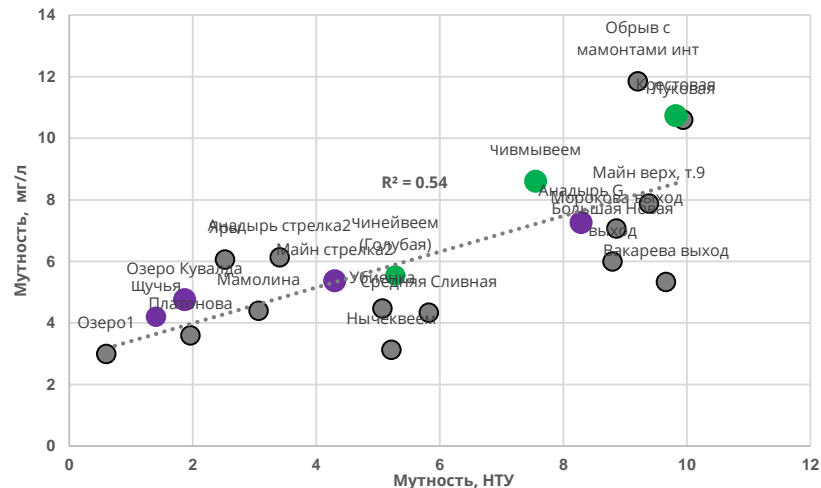
2. Gitelson, A.A. The peak near 700 nm on radiance spectra of algae and water: Relationships of its magnitude and position with chlorophyll concentration. Int. J. Remote Sens. 1992, 13, 3367–3373
3. Brezonik, P.; Menken, K.D.; Bauer, M. Landsat-based remote sensing of lake water quality characteristics, including chlorophyll and colored dissolved organic matter (CDOM). Lake Reserv. Manag. 2005, 21, 373–382.
4. Toming K. et al. First experiences in mapping lake water quality parameters with Sentinel-2 MSI imagery // Remote Sensing. – 2016. – Т. 8. – №. 8. – С. 640.



## Половодье 2021



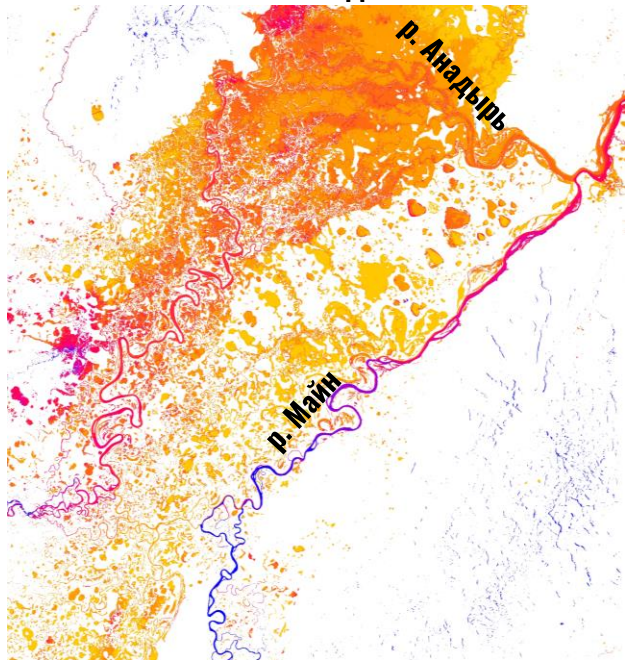
## Межень 2022



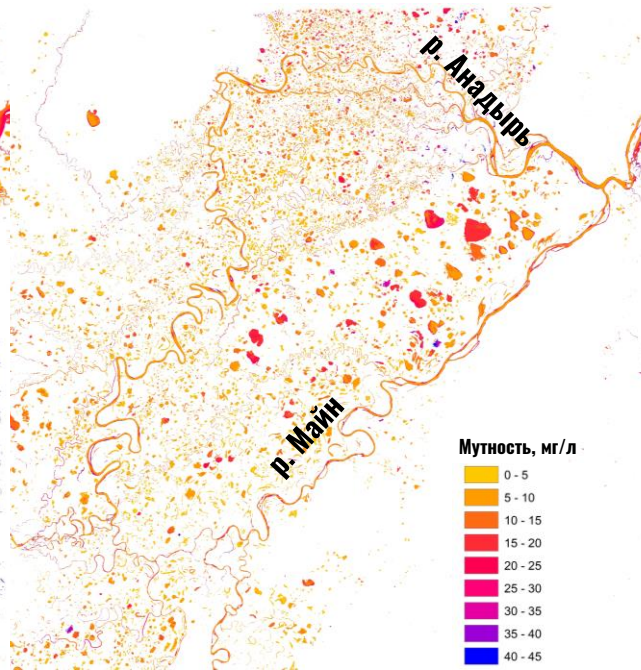
Отношения оптической и весовых мутностей для бассейна р. Анадырь в разные фазы водного режима с выделением повышенного содержания хлорофилла по каналу B5 (инфракрасный) и CDOM по отношению каналов B3 и B4 (зеленого и красный соответственно) по снимкам Sentinel-2 28.06.21 и 09.08.22

# Пространственный анализ распределения мутности

Половодье 2021



Межень 2022



Мутность, мг/л



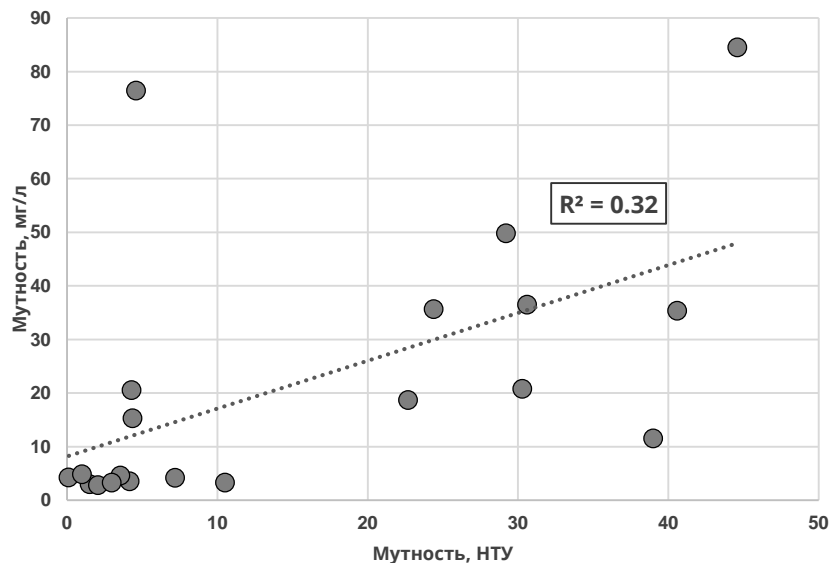
Общая зависимость мутности мг/л от коэффициента отражения  $\rho$ , пкс (красный канал В4 снимка Sentinel-2):

$$S = 730,62\rho - 6,20$$
$$R^2 = 0.75$$

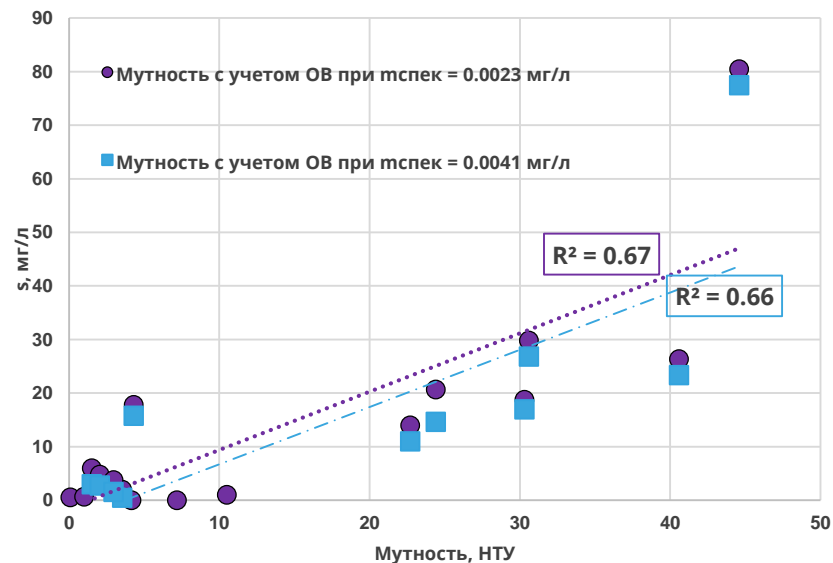
Распределение значений мутности мг/л, полученных по зависимости полевых данных и коэффициента отражения  $\rho$ , пкс (канал В4 по снимкам Sentinel-2 28.06.21 и 09.08.22)

# Полевые данные 2024 г.:

## Без учета органического вещества



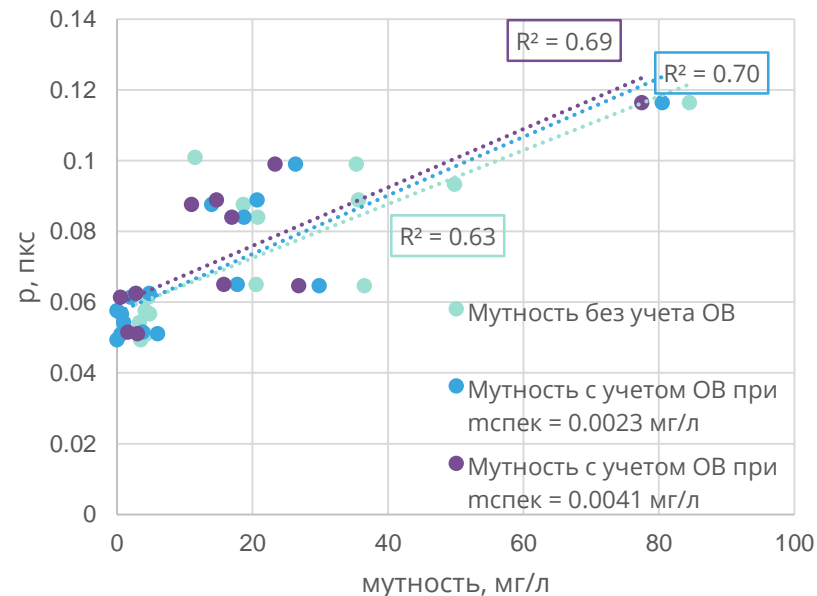
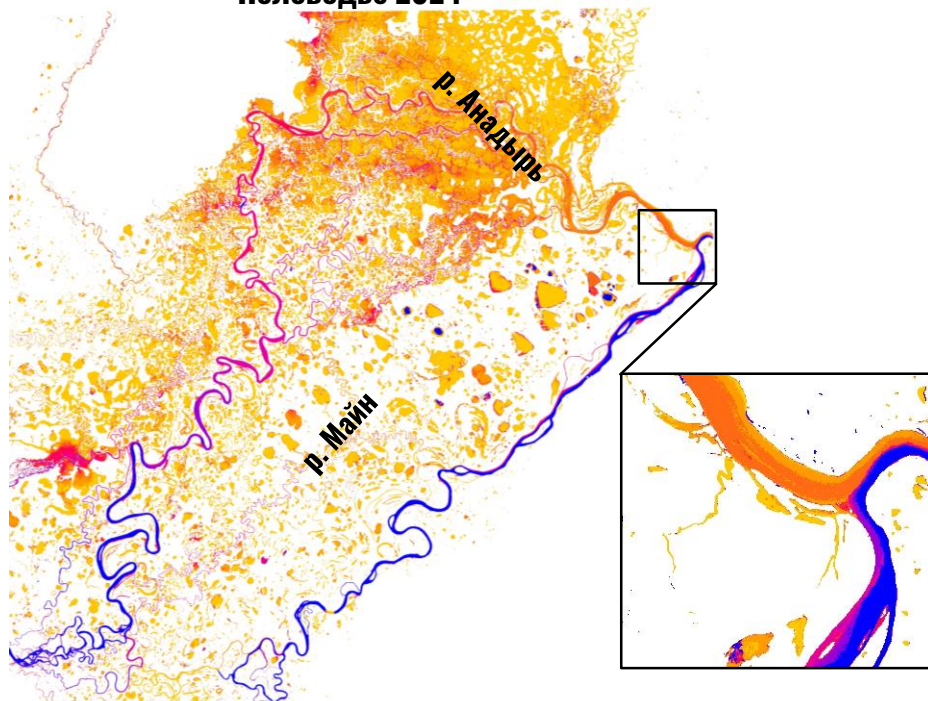
## С учетом органического вещества



Отношения оптической и весовых мутностей для бассейна р. Анадырь в половодье 2024 года без учета и с учетом органического вещества

# Пространственный анализ распределения мутности

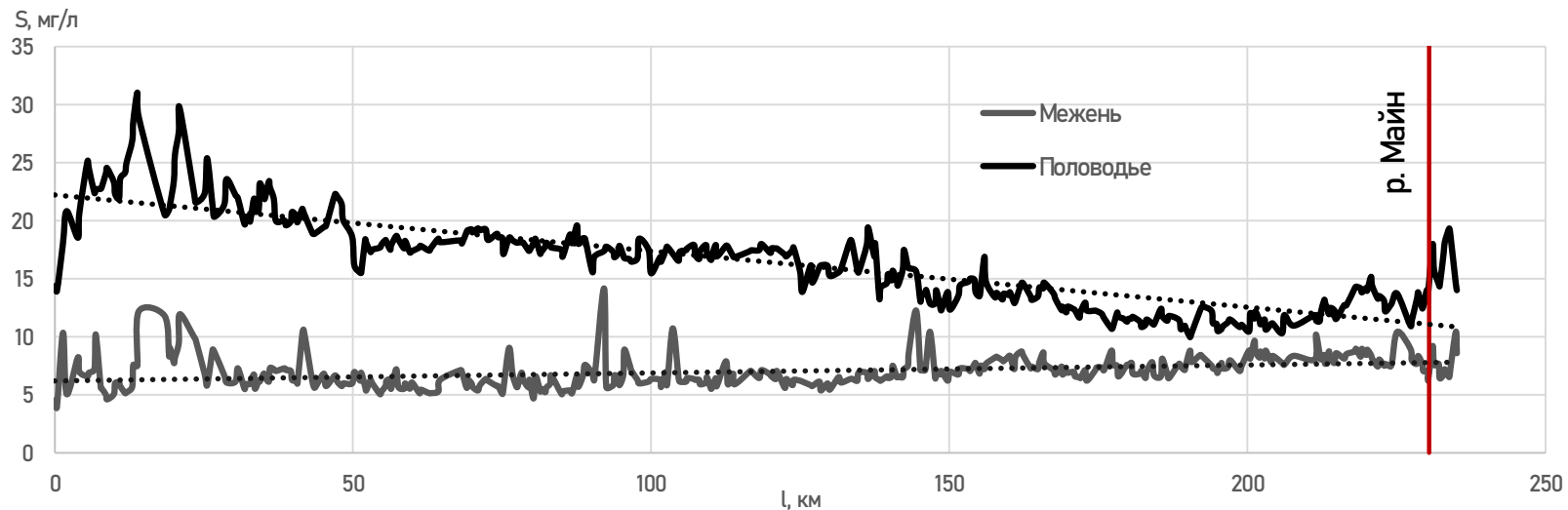
Половодье 2024



Распределение значений мутности мг/л, полученных по зависимости полевых данных и коэффициента отражения  $p$ , пкс (канал V4 по снимку Sentinel-2 17.06.23)

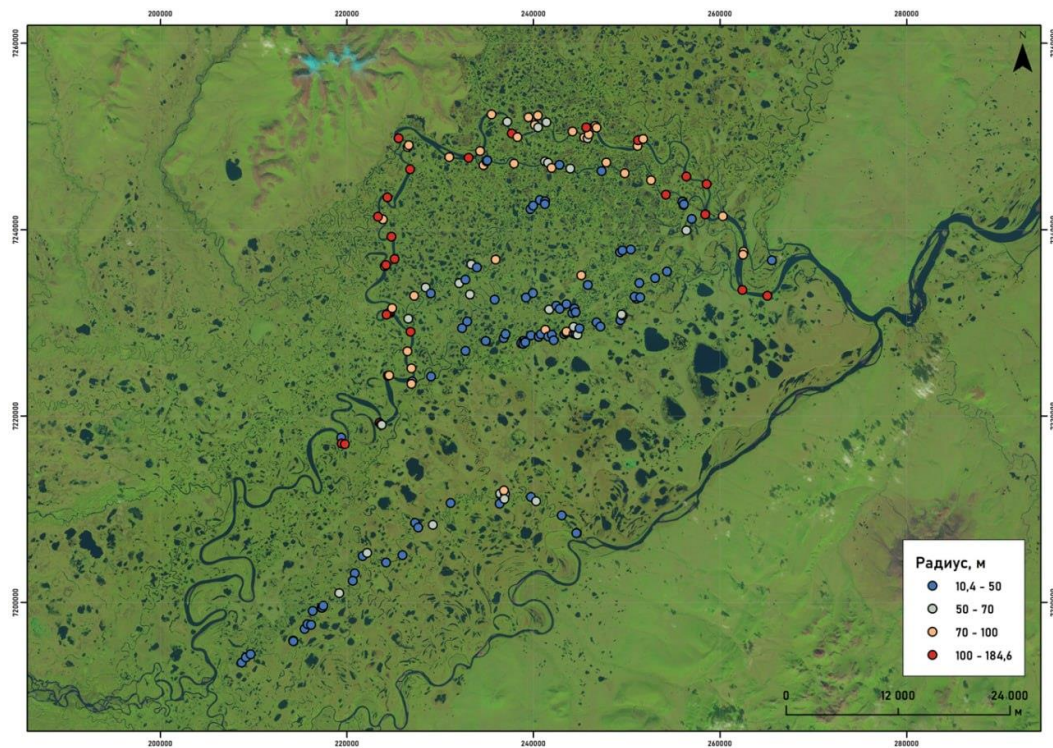
Отношение весовой мутности и коэффициента отражения  $p$  для бассейна р. Анадырь по снимку Sentinel-2 17.06.24

# Пространственный анализ распределения мутности

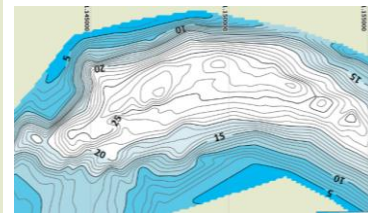
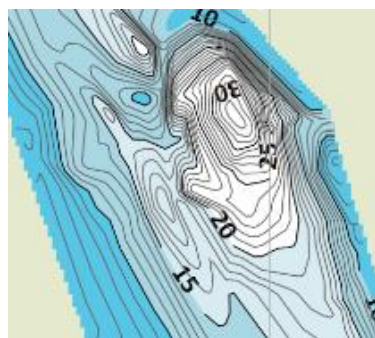


Продольные профили значений мутности (в мг/л) по длине р. Анадырь

# Ямы на разветвленном участке реки Анадырь



Переуглубленные участки в пределах Анадыро-Майнского разветвления



Карты глубин для участков р. Анадырь

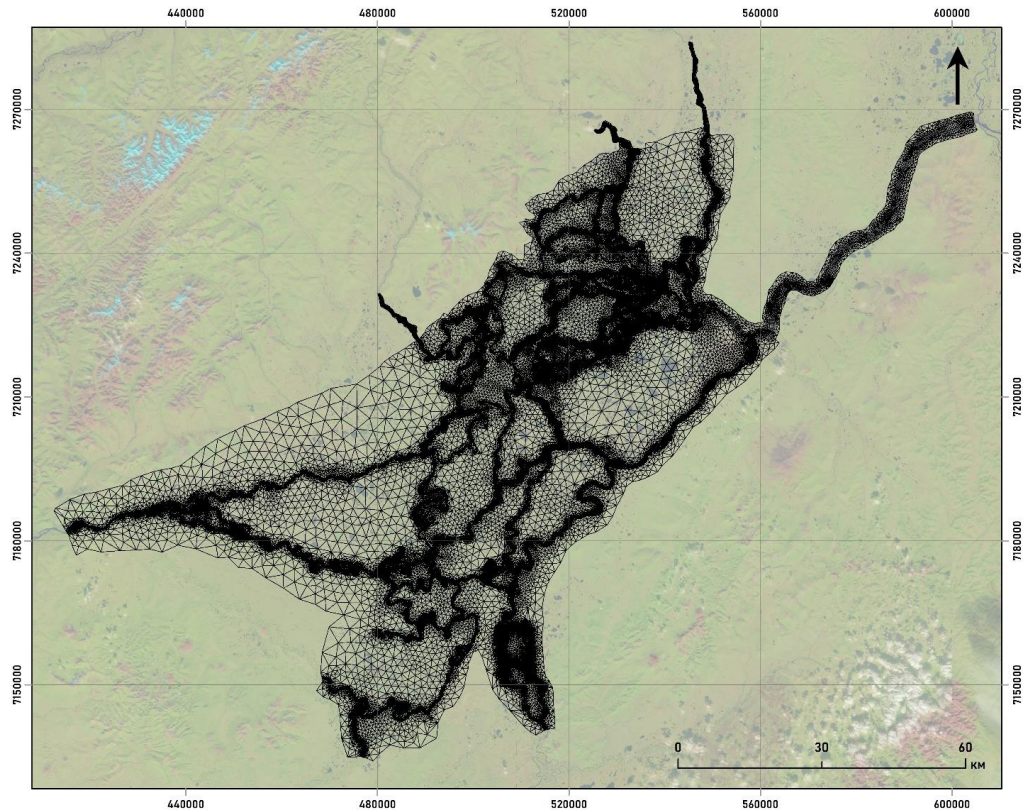
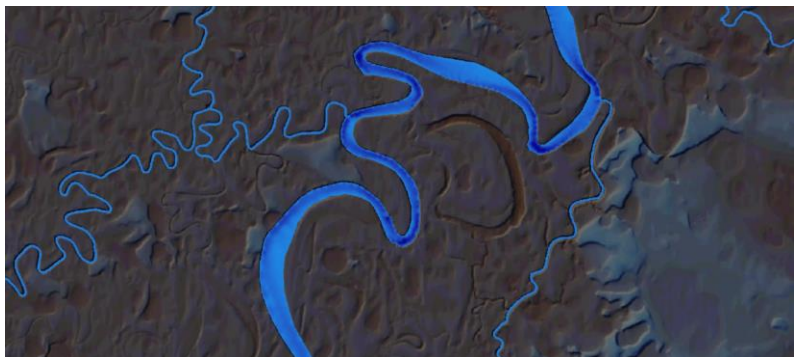
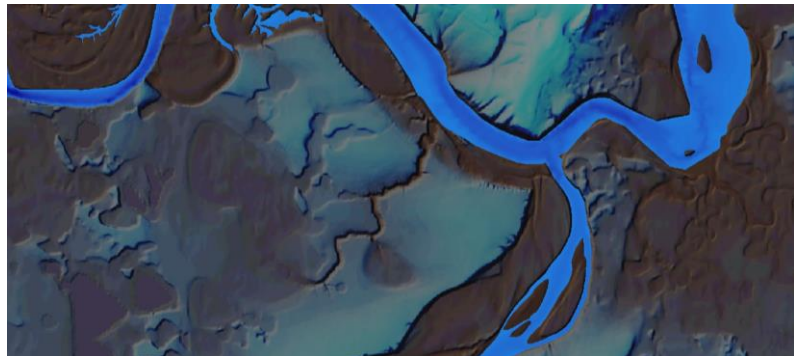
# Причины формирования ям

1. Геологические факторы (пересекающие реки разломы, резкая смена характера донного грунта, сужения потока)
2. Пересечение потоков в узлах слияния рек
3. Водоворотные явления (в том числе, связанные с ледоходом)
4. Размыв берегов в вершинах крутых излучин и захват реками озерных котловин
5. Специфические процессы, в том числе - криогенные



# Подготовка двумерной гидродинамической модели

## Схематизация расчетной области





# Применение данных ДЗЗ

## Методы исследования:

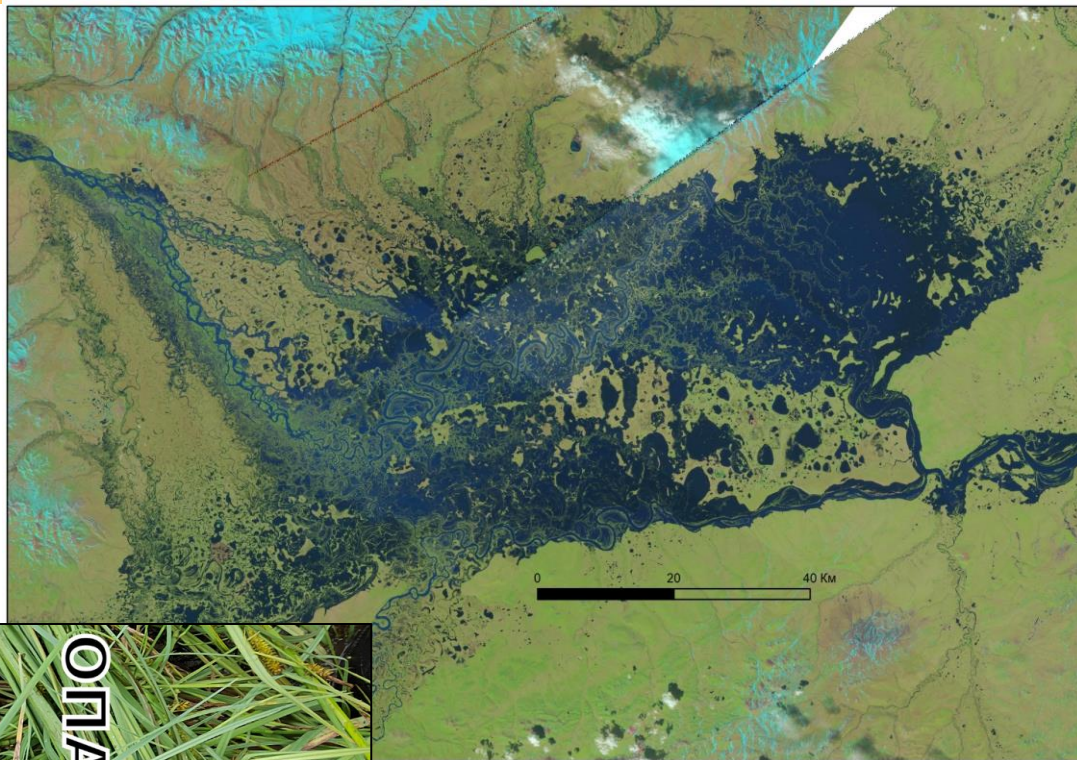
1. Определение площадей затопления
2. Расчет объема затопления
3. Оценка мутности воды по космическим снимком
4. Применение альтиметрических данных для определения отметок водной поверхности

## Материалы:

- Облачная платформа Google Earth Engine (GEE)
- Спутниковые снимки Sentinel-2
- Данные радиометрии Jason-3, Sentinel-3A
- ЦМР FABDEM

# Русловой режим (верхняя часть)

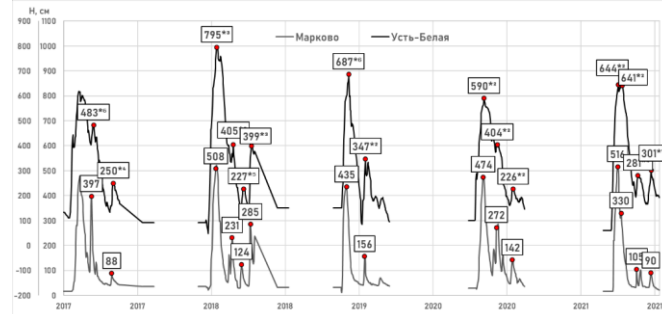
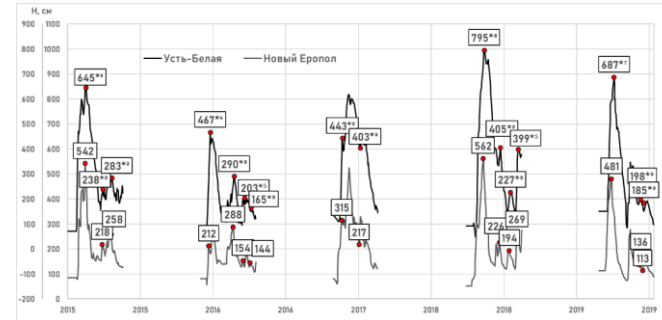
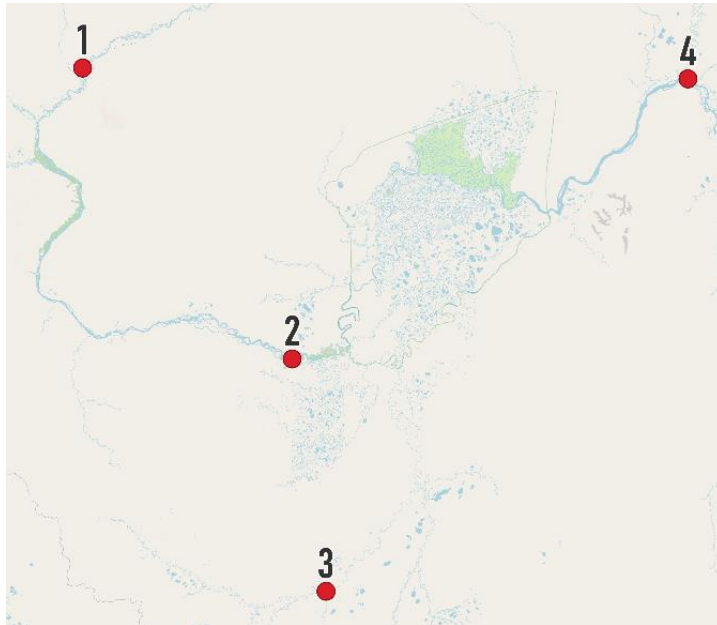
В верхней части при прохождении половодья за счет особенностей рельефа происходит затопление значительной площади поймы (до 4500 км<sup>2</sup>)



Затопление  
сопровождается  
значительного  
материала

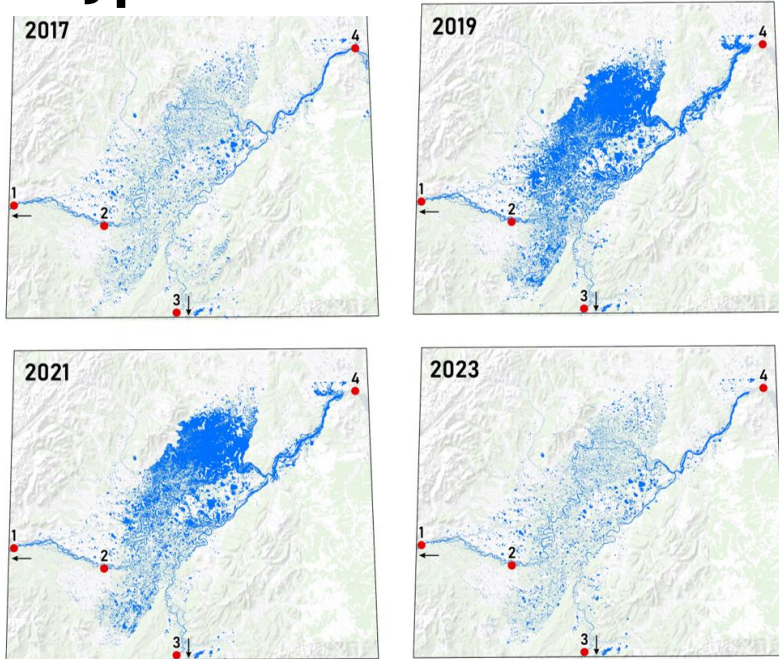
должно  
аккумуляцией  
объема

# Связь площадей затопления и данных наблюдений за уровнями



Расположение уровненых постов на границе разветвления (1 – Новый Еропол, 2 – Марково, 3 – Ваеги, 4 – Усть-Белая) (слева) и совмещенные графики колебаний уровня р. Анадырь на г/п Усть-Белая и Новый Еропол и на г/п Усть-Белая и Марково (слева)

# Связь площадей затопления и данных наблюдений за уровнями



Площадь водной поверхности по индексу MNDWI в пределах Анадыро-Майнского разветвления (снимки Sentinel-2 от 29.09.17, 14.06.19, 28.06.21 и 27.08.23)

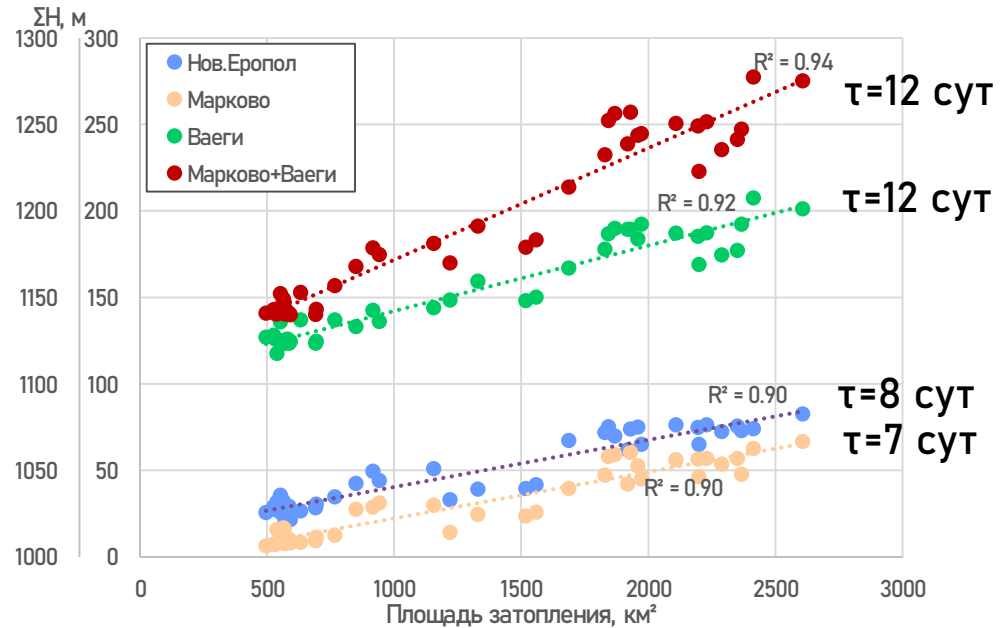
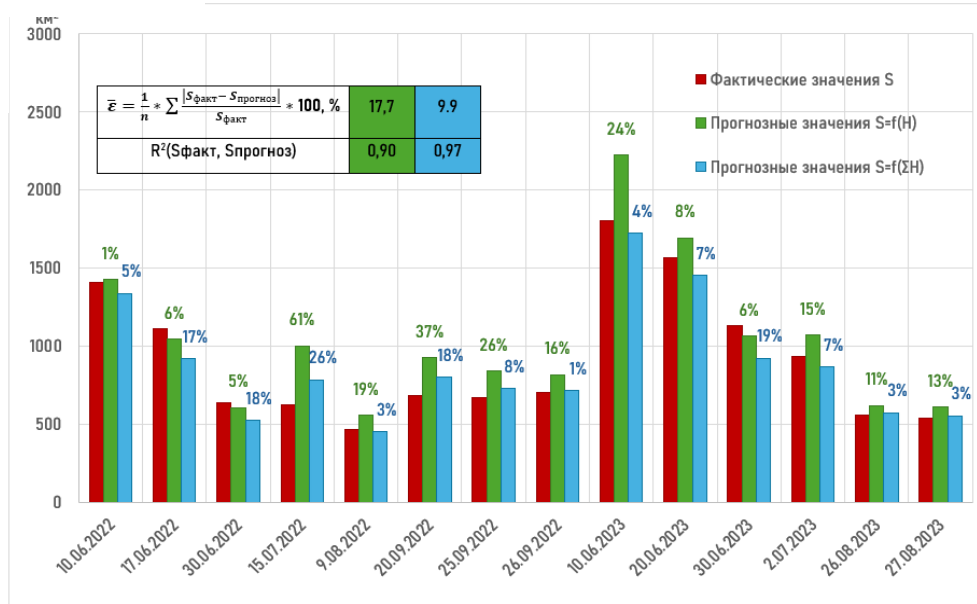


График связи площадей затопления верхнего участка Анадыро-Майнского разветвления от сумм уровней воды на г/п Новый Еропол, Марково, Ваеги и Усть-Белая в период с 2017 по 2021 гг., где  $\tau$  – время добегания, N – количество дней с суммированными уровнями

# Создание прогностических зависимостей для площадей затопления по уровням на вышележащих постах



Фактические и прогнозные значения площади затопления верхнего участка Анадыро-Майнского разветвления в период с 2022 по 2023 гг., где процентные значения на графике – абсолютная процентная ошибка  $\varepsilon$

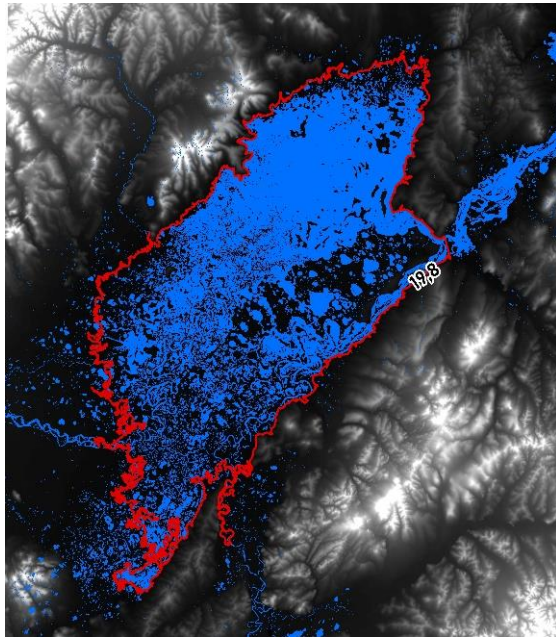
$$S_t \text{ (км}^2\text{)} = f(H_{\text{Марково}, t+7})$$

где  $S_t$  – площадь затопления в момент времени  $t$ ,  
 $H_{\text{Марково}, t+7}$  – уровень воды на г/п Марково с  $\tau = 7$  сут,

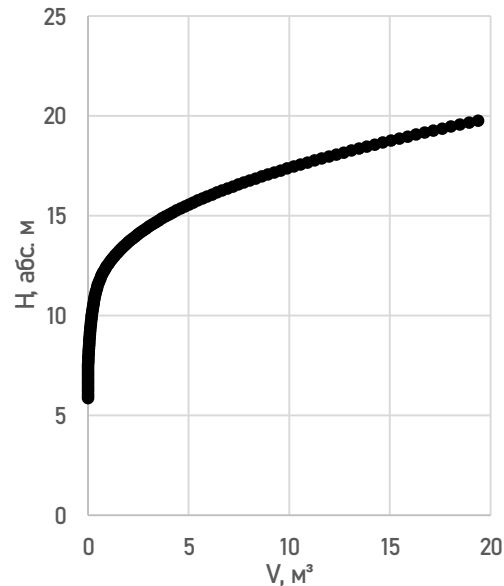
$$S_t \text{ (км}^2\text{)} = f\left(\sum_{i=4}^{N=15} H_{\text{Марково}}\right)$$

где  $S_t$  – площадь затопления в момент времени  $t$ ,  
 $N$  – день начала суммирования уровней,  
 $i$  – дата снимка

# Объем предельного затопления



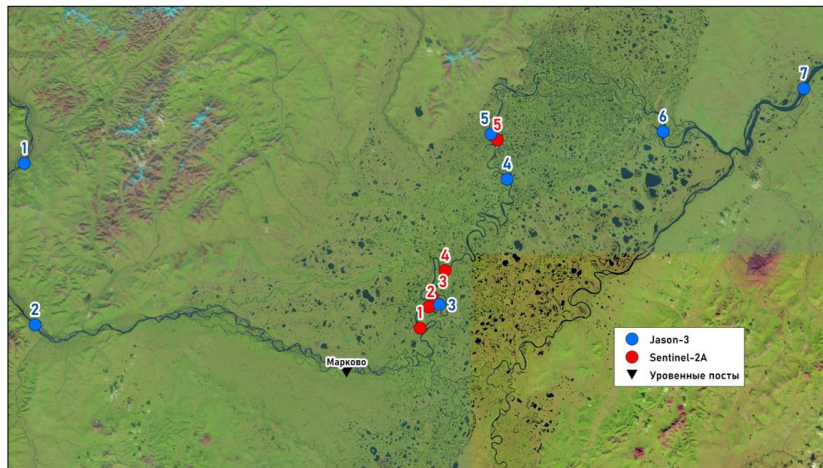
Уровень предельного затопления (слева) и кривая объемов воды (справа)



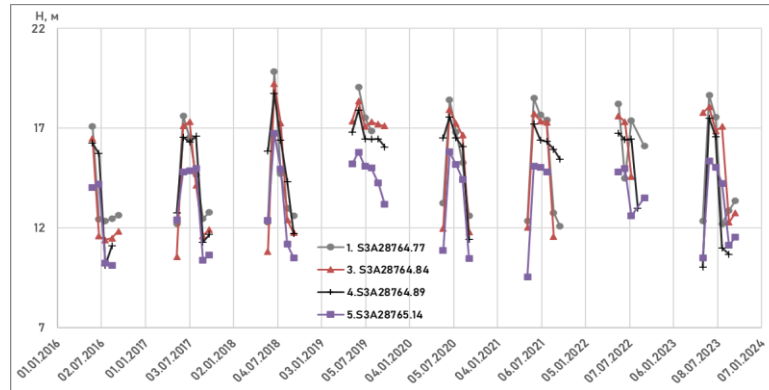
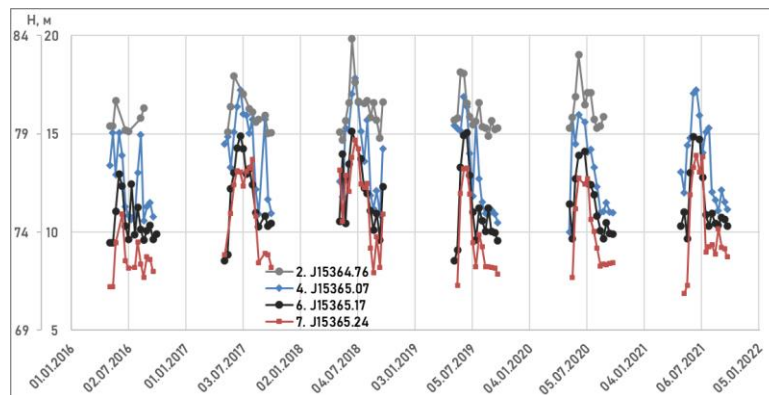
Объемы русел в пределах разветвления и их процентные отношения от объема затопления

Водоток	V русла, км³	% от V затоп
Анадырь	0,41	2,1
Майн	0,07	0,4
Прорва	0,01	0,04
Луковая	0,02	0,11
Морокова	0,007	0,04
Большая Новая	0,007	0,04
Средняя	0,004	0,02
Вакарева	0,004	0,02
Все	0,5	2,7

# Определение уровней водной поверхности

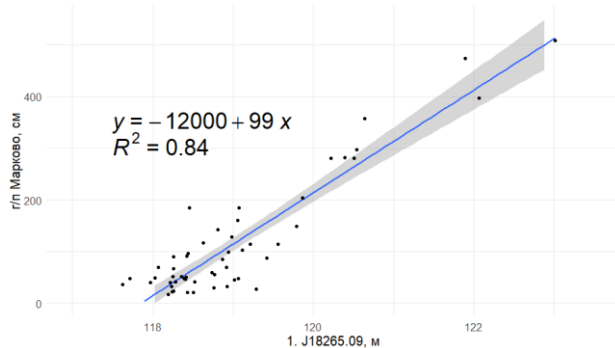
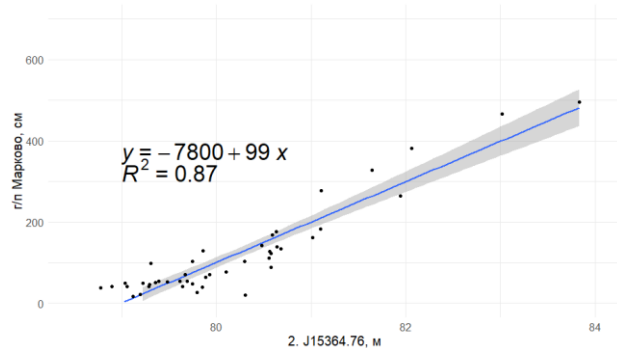
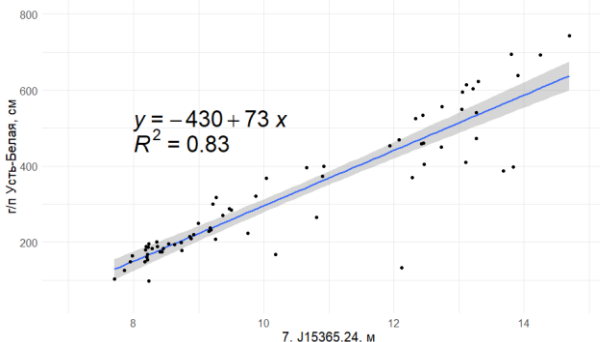
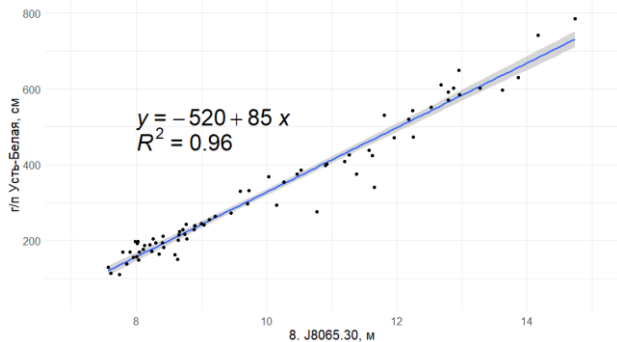


Точки с альтиметрическими данными для Анадыро-Майнского разветвления с указанием нумерации сверху вниз по течению р. Анадырь



Уровни водной поверхности по данным спутников Jason-3 (сверху) и Sentinel-3A (снизу)

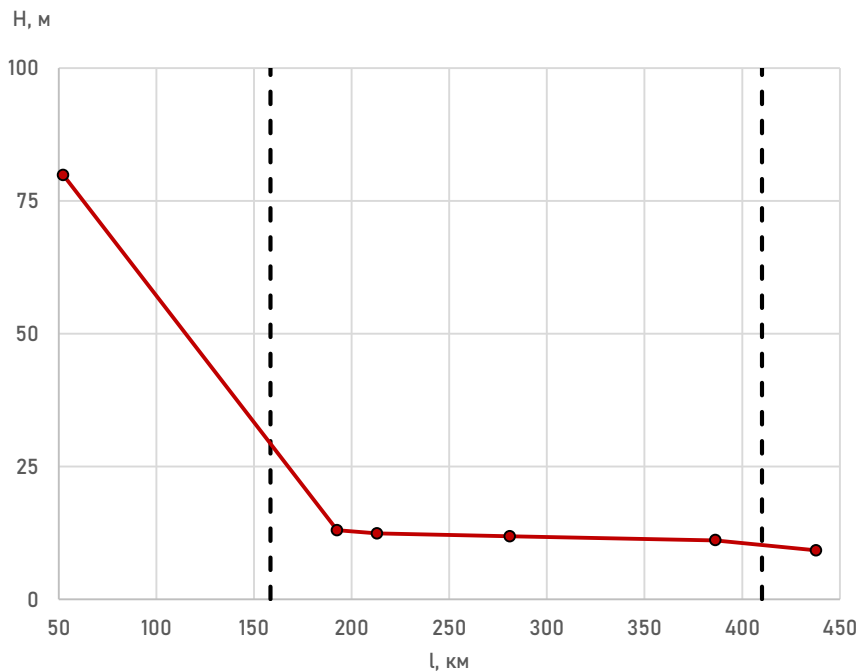
# Связь с гидрологическими постами



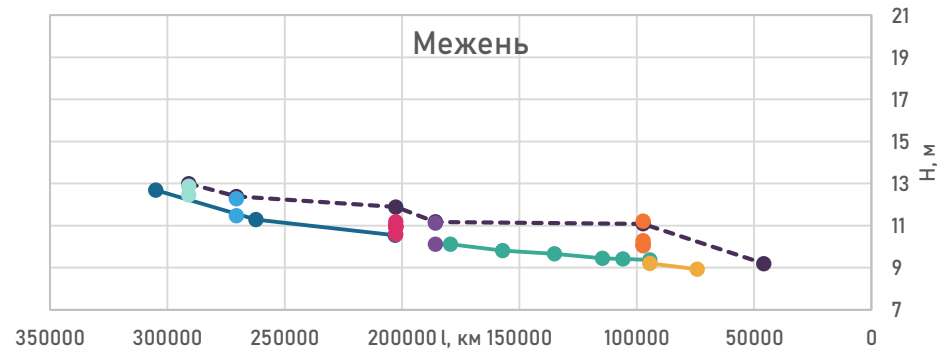
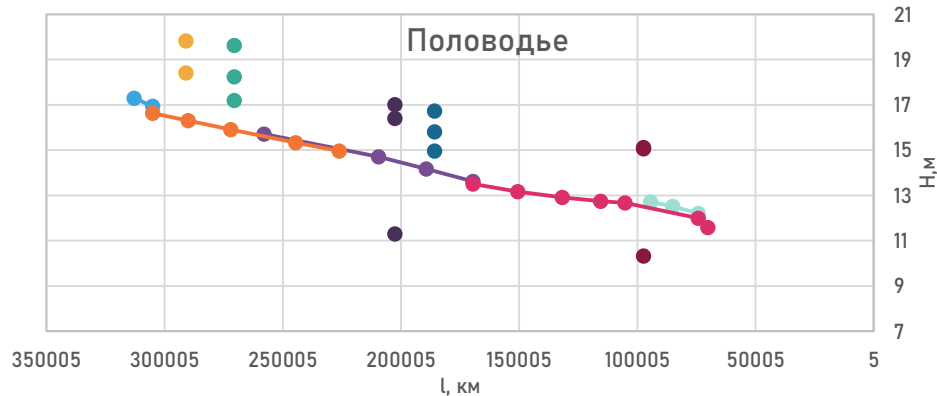
Графики связей измерений на виртуальных станциях Jason-3 и уровней на гидрологических постах с заданным временем добегаания для г/п Марково в 1 день



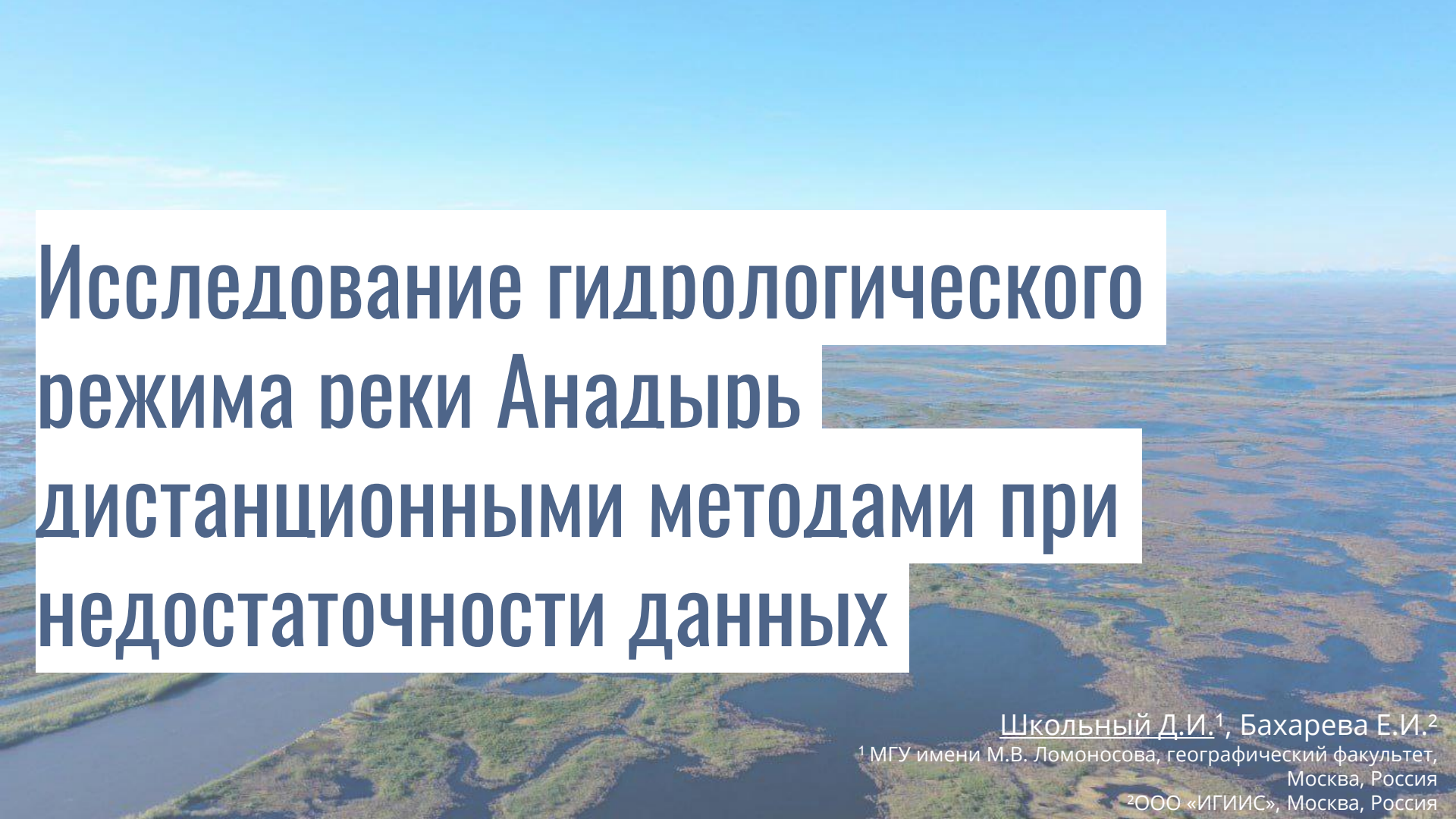
# Уклон водной поверхности



Высоты водной поверхности, полученные по альтиметрическим данными для р. Анадырь с указанием границ разветвления



Сопоставление полевых и альтиметрических данных



# Исследование гидрологического режима реки Анадырь дистанционными методами при недостаточности данных

Школьный Д.И.<sup>1</sup>, Бахарева Е.И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет,  
Москва, Россия

<sup>2</sup>ООО «ИГИИС», Москва, Россия