

Определение мутности воды в оптически сложных водах по данным Landsat-8/9 и Sentinel-2

Жаданова П.Д.

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

2026

Четырнадцатая международная школа-семинар
«Спутниковые методы и системы исследования Земли»



Исследуемый район Черного моря, приустьевая зона р. Мзымта



Исследуемые районы Каспийского моря, р. Терек и р. Сулак

Что уже было сделано в 2022–2025 годах

Верификация алгоритмов Nechad и Dogliottiv плюмах Сулака и Терека

Проведено сопоставление спутниковых и контактных измерений мутности и взвешенного вещества в приустьевых зонах рек Сулак и Терек. Показано, что характеристики плюмов существенно различаются даже в пределах одного региона. (Жаданова, Лаврова, 2022)

Верификация алгоритмов Nechad и Dogliotti

Проведена оценка применимости алгоритмов определения мутности и концентрации взвешенного вещества для прибрежных вод Чёрного и Каспийского морей. Установлено, что универсального алгоритма для всех исследуемых акваторий не существует. (Жаданова, Назирова, 2023)

Сравнение Landsat-8/9 и Sentinel-2

Выполнено сравнение результатов определения мутности по данным Landsat-8/9 и Sentinel-2. Показано, что выбор спутникового сенсора влияет на количественные оценки мутности, особенно при высоких значениях NTU. (Жаданова, Лаврова, 2024)

Текущий этап — Подход к созданию регионального алгоритма для р. Сулак

Анализ предыдущих результатов показал, что именно для плюма р. Сулак стандартные алгоритмы демонстрируют наибольшие ошибки. В настоящее время ведётся работа по региональной адаптации алгоритма определения мутности для данной акватории.

Алгоритмы расчета мутности воды

1) Алгоритм Nechad (Nechad et al., 2009):

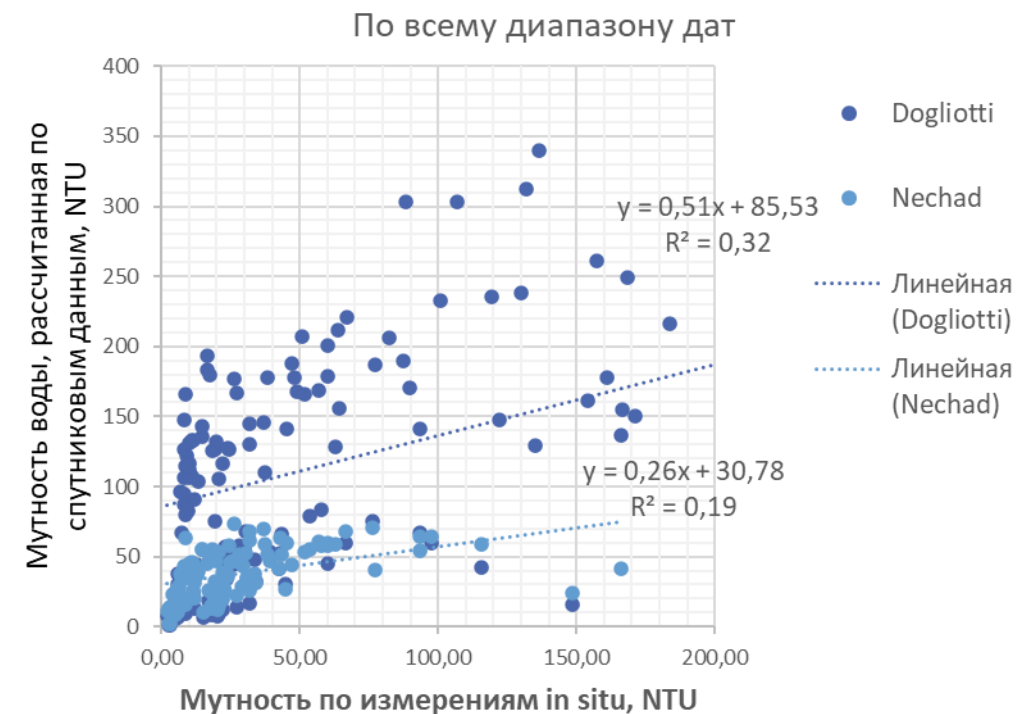
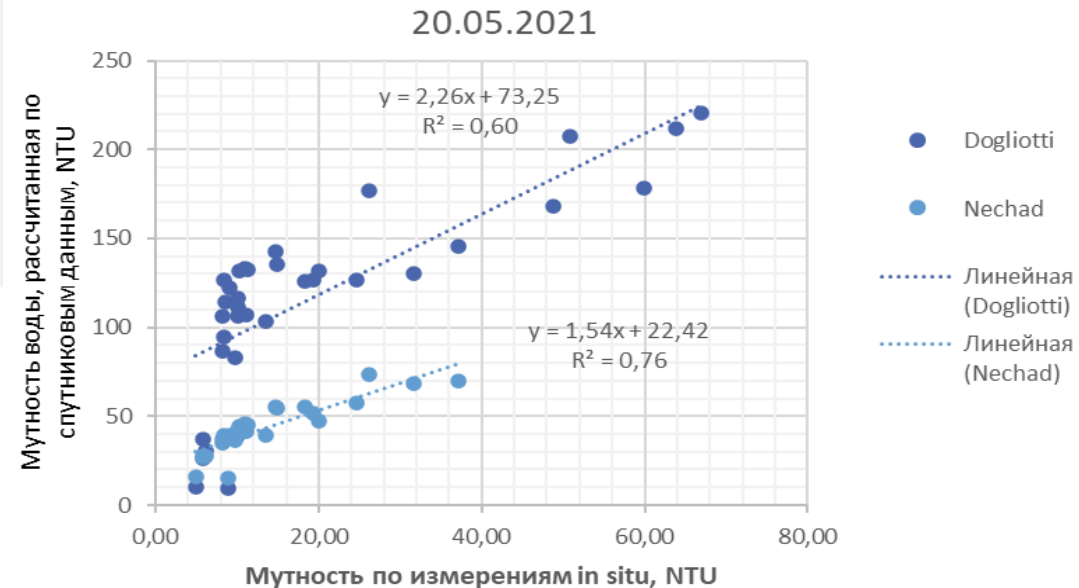
$$T = \frac{A_T \rho_w}{1 - \frac{\rho_w}{C}},$$

где T – мутность воды, A_T и C – калибровочные коэффициенты, ρ_w - коэффициент спектральной яркости водной поверхности на длине волны $\sim 681\text{нм}$

2) Алгоритм Dogliotti (Dogliotti et al., 2015):

$$T = (1 - w) \cdot T^{645} + w \cdot T^{859},$$

где T – мутность воды, рассчитанная по алгоритму Nechad с использованием коэффициента спектральной яркости на длине волны $\sim 645\text{нм}$ и 859нм , w – весовой коэффициент, зависящий от величины спектральной яркости, меняющийся от 0 до 1



Разработка алгоритма. Данные

Объём выборки	167 наблюдений
Спутники	Landsat-8/9, Sentinel-2
Каналы	Red, NIR
Диапазон мутности	2 – 250 NTU
Тип данных	Спутниковые + in situ

Анализ распределения данных показал целесообразность выделения трёх диапазонов мутности:

- низкая мутность: $T < 50$ NTU,
- средняя мутность: $50 \leq T < 120$ NTU,
- высокая мутность: $T \geq 120$ NTU (в пределах калибровочного диапазона $T \leq 250$ NTU).

Выбор границ обусловлен характером изменения структуры ошибок и наблюдаемыми особенностями спектрального отклика в соответствующих интервалах.

Диапазон мутности воды	Количество	Доля
Low (<50)	98	~58%
Mid (50–150)	47	~28%
High (>150)	22	~14%

Выбор функциональной формы алгоритма. Однополосные модели

$$T = \frac{A \cdot \rho_i}{1 - \rho_i/C},$$

где

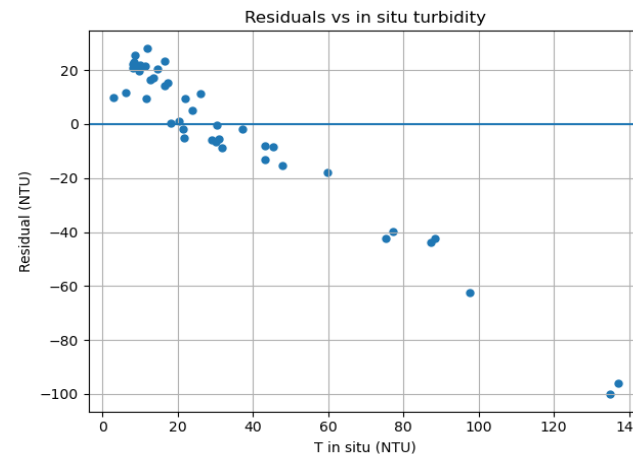
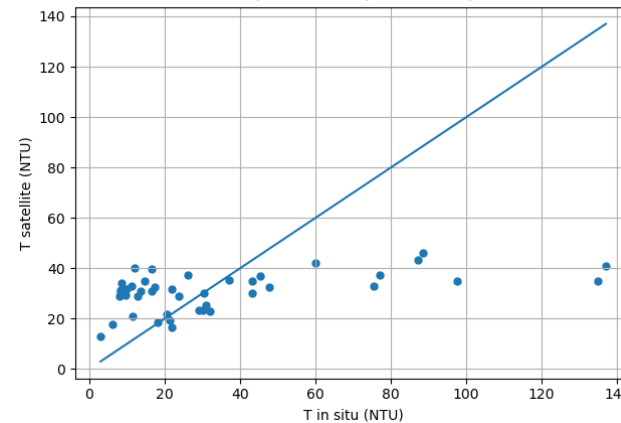
T — мутность воды (NTU),

ρ_i — отражательная способность поверхности воды в красном и ближнем инфракрасном канале,

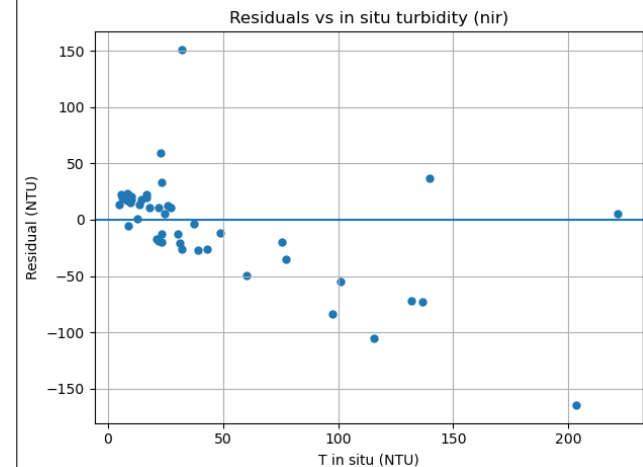
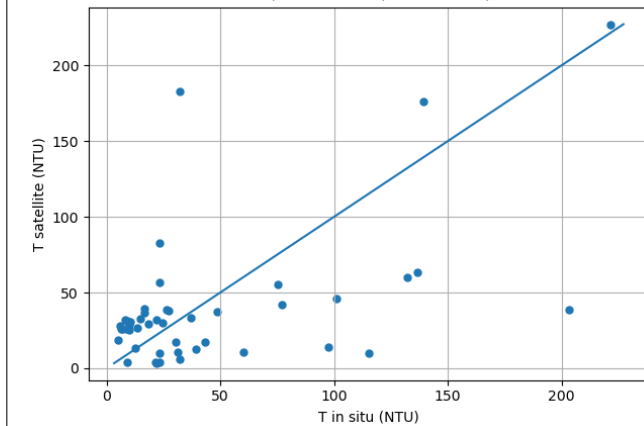
Аи C — эмпирические коэффициенты, определяемые методом нелинейной робастной регрессии.

	RMSE	MAE	Bias	R2
Red	30	21	-3.7	0.17
Nir	47	32	-5.6	0.15

Nechad(red)



Nechad(nir)



Выводы по однополосным моделям

Результаты проведенного анализа позволяют сделать следующие выводы:

1. Однополосная региональная модель на основе red-канала обеспечивает удовлетворительную точность в диапазоне низкой и средней мутности, однако демонстрирует эффект насыщения при высоких значениях.
2. Модель на основе NIR-канала характеризуется низкой объясняющей способностью и значительным разбросом, особенно в области малых значений мутности.
3. Ни один из однополосных вариантов не обеспечивает устойчивой аппроксимации во всём диапазоне наблюдаемых значений.

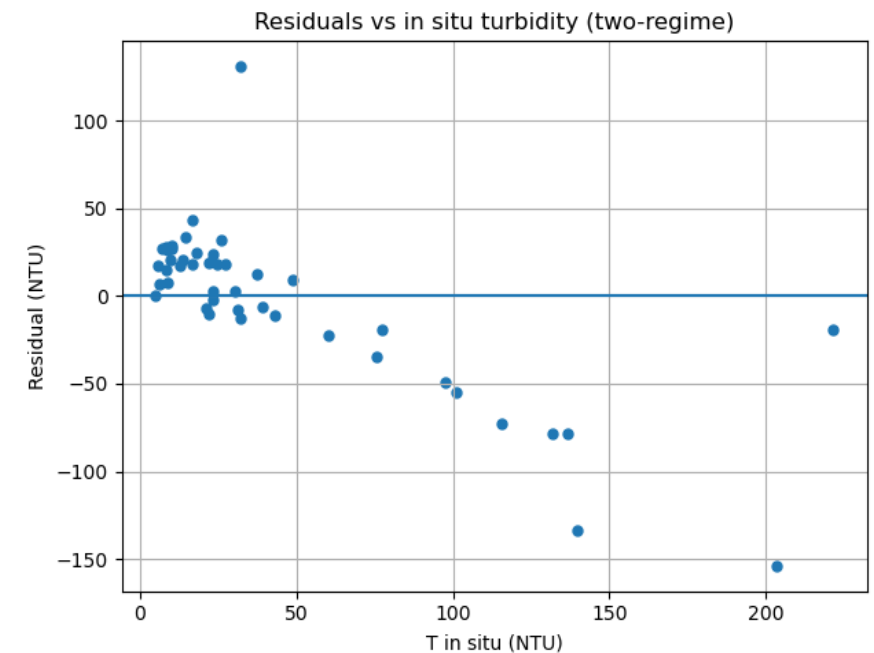
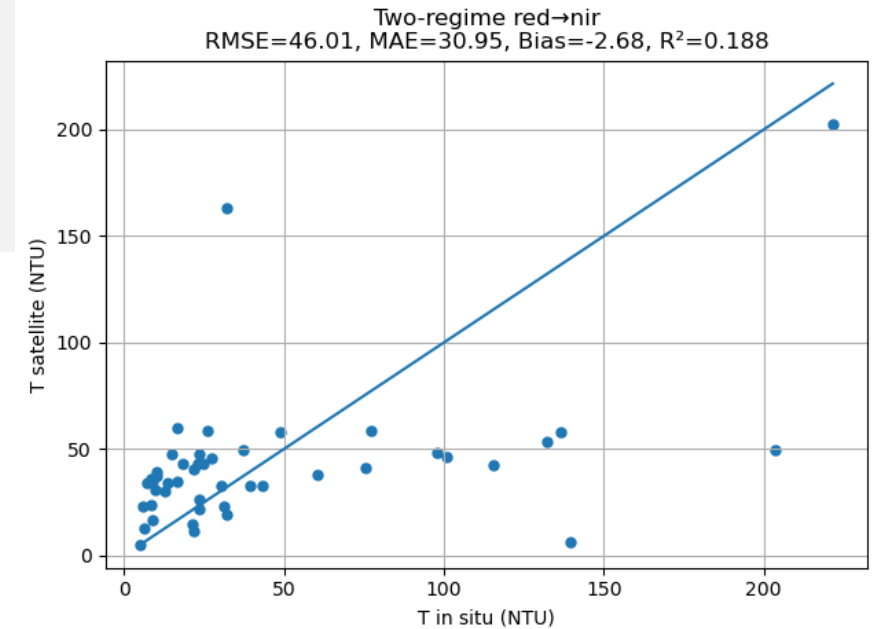
Полученные результаты обосновывают необходимость разработки двухрежимного регионального алгоритма, учитывающего изменение спектральной чувствительности в зависимости от уровня мутности воды.

Результаты реализации двухрежимного регионального алгоритма (red–nir)

С целью повышения устойчивости оценки мутности воды во всём диапазоне наблюдаемых значений была реализована двухрежимная схема, основанная на комбинированном использовании красного (red) и ближнего инфракрасного (nir) каналов.

- RMSE = 46.0 NTU,
- MAE = 30.9 NTU,
- Bias = -2.68 NTU,
- $R^2 = 0.188$.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что использование только механизма спектрального переключения при сохранении фиксированной функциональной формы типа Nechad не обеспечивает достаточной гибкости модели для описания исследуемых вод.



Модификация функциональной формы регионального алгоритма: степенная модель

Для описания нелинейной зависимости между отражательной способностью и концентрацией взвешенного вещества в речных и прибрежных водах широко используется степенная форма:

$$T = a \cdot \rho^b,$$

В качестве новой функциональной формы была выбрана логарифмическая линейная зависимость:

$$\log T = a + b \log(\rho_{red}) + c \log(\rho_{nir}),$$

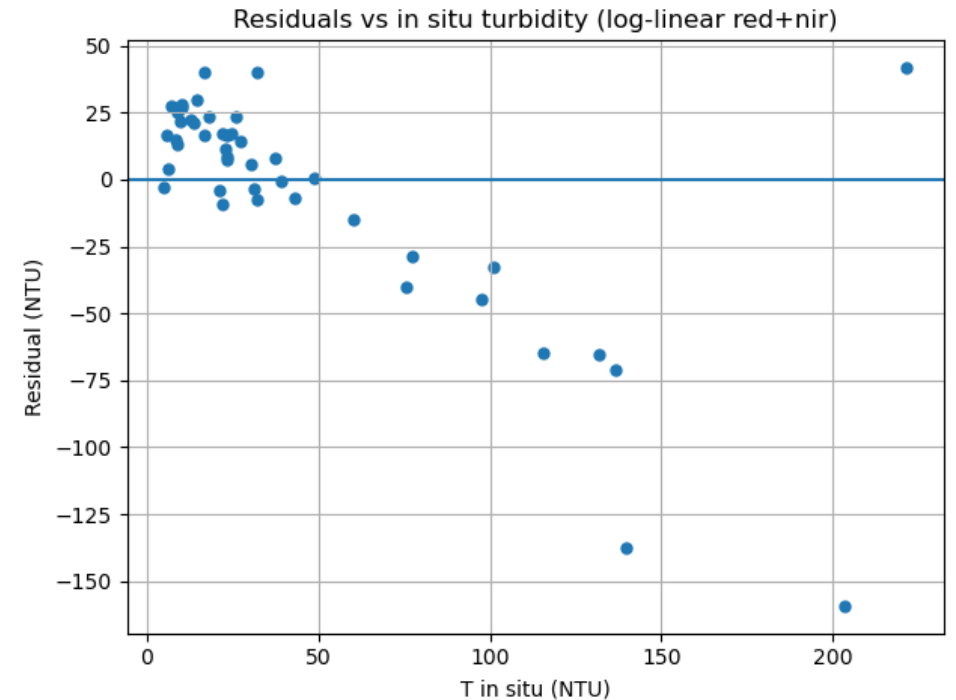
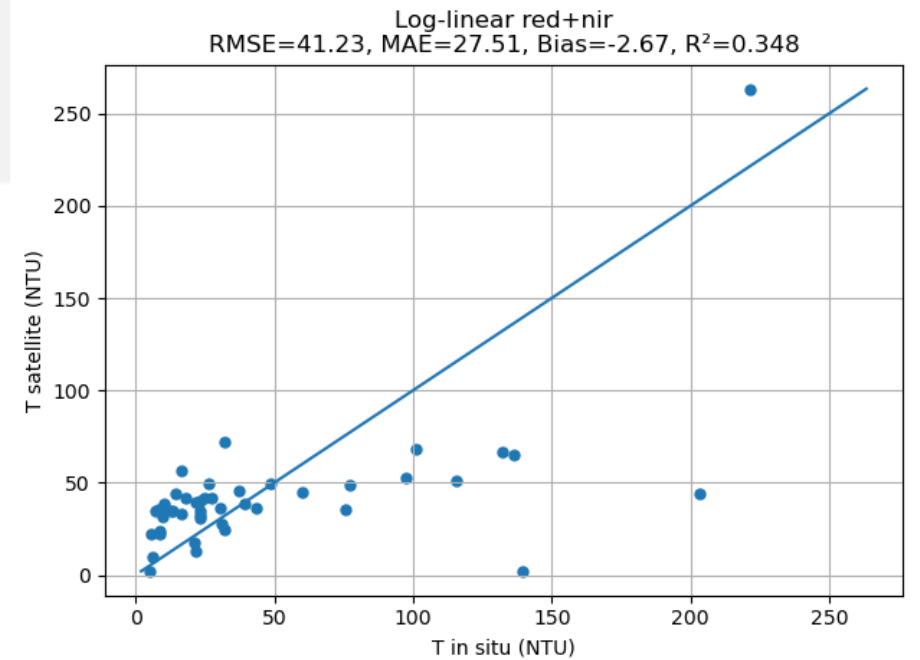
где

T — мутность воды (NTU),

ρ_{red} , ρ_{nir} — отражательная способность поверхности воды в соответствующих спектральных каналах,

a , b , c — эмпирические коэффициенты.

- $RMSE \approx 41.2$ NTU,
- $MAE \approx 27.5$ NTU,
- $Bias \approx -2.67$ NTU,
- $R^2 \approx 0.348$.



Реализация стратифицированной модели Формирование диапазонов

Объём выборки	167 наблюдений
Спутники	Landsat-8/9, Sentinel-2
Каналы	Red, NIR
Диапазон мутности	2 – 250 NTU
Тип данных	Спутниковые + in situ

Анализ распределения данных показал целесообразность выделения трёх диапазонов мутности:

- низкая мутность: $T < 50$ NTU,
- средняя мутность: $50 \leq T < 120$ NTU,
- высокая мутность: $T \geq 120$ NTU (в пределах калибровочного диапазона $T \leq 250$ NTU).

Выбор границ обусловлен характером изменения структуры ошибок и наблюдаемыми особенностями спектрального отклика в соответствующих интервалах.

Диапазон мутности воды	Количество	Доля
Low (<50)	98	~58%
Mid (50–120)	47	~28%
High (>120)	22	~14%

Стратифицированная модель

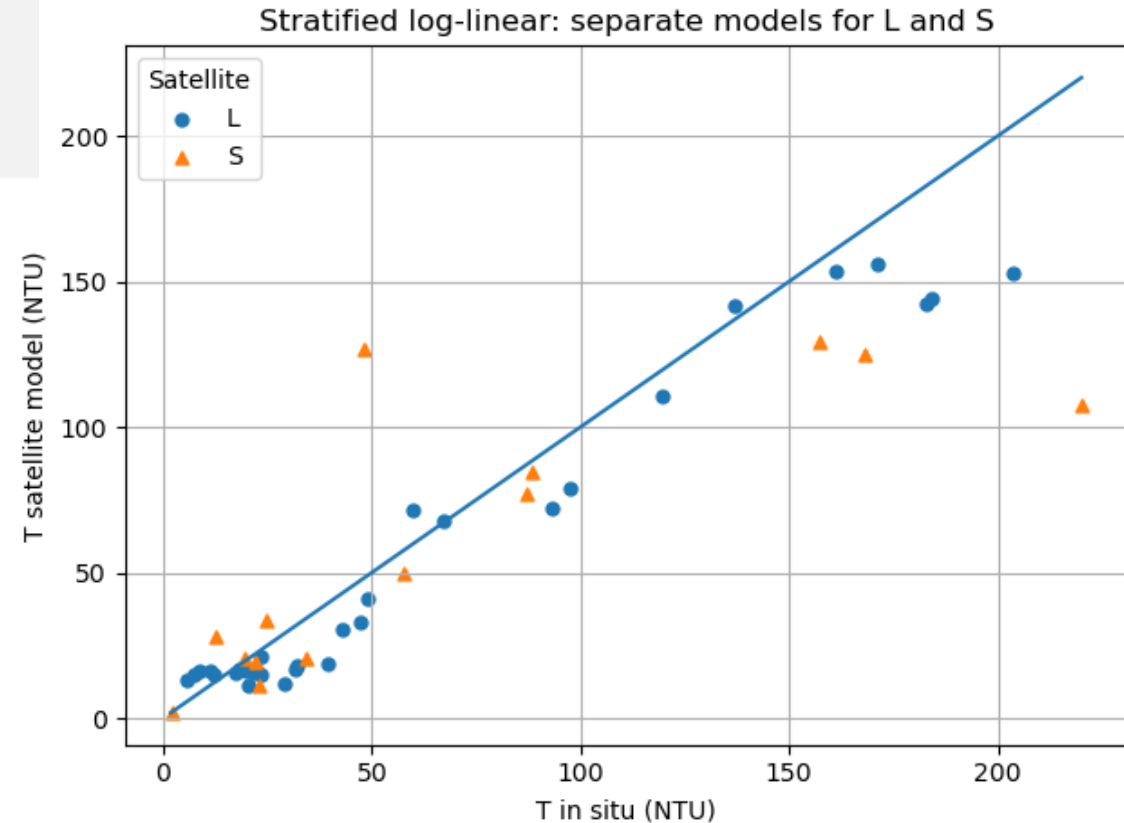
Для каждого спутника $s \in \{L, S\}$ и каждого режима $k \in \{LOW, MID, HIGH\}$ оценивались собственные коэффициенты $(a_{s,k}, b_{s,k}, c_{s,k})$:

$$\ln T = a_{s,k} + b_{s,k} \ln R_{\text{red}} + c_{s,k} \ln R_{\text{nir}}$$

Режимы k :

- LOW (низкая мутность) : $T < 50$ NTU,
- MID (средняя мутность) : $50 \leq T < 120$ NTU,
- HIGH (высокая мутность) : $T \geq 120$ NTU (в пределах калибровочного диапазона $T \leq 250$ NTU).

Переключение режимов основывалось на in-situ данных! Подобная модель была испробована с целью убедиться в необходимости и правильности данного подхода.



Спутник	RMSE	MAE	Bias	R2
Landsat	17.0	12.4	-9.43	0.92
Sentinel	39.9	24.2	-9.39	0.623

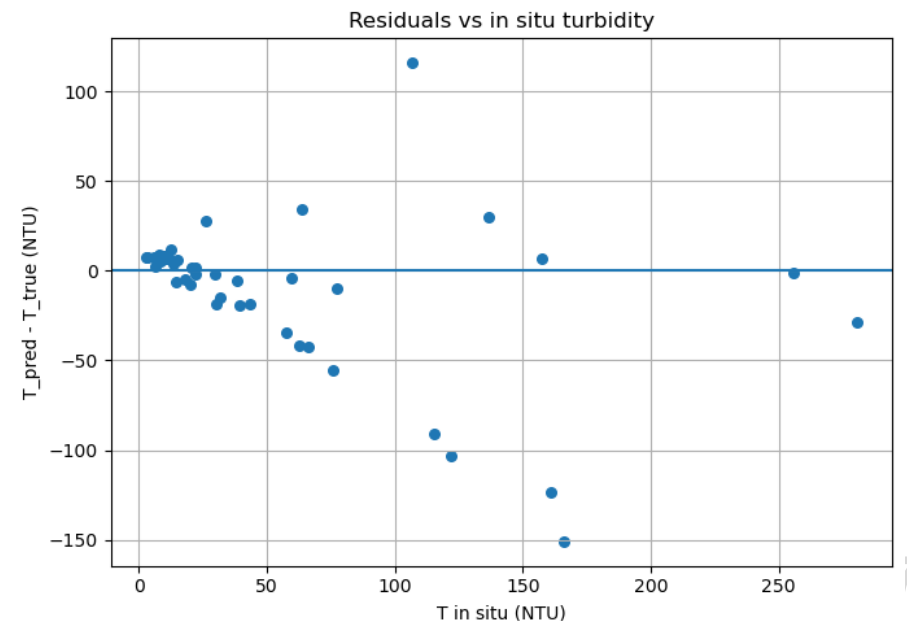
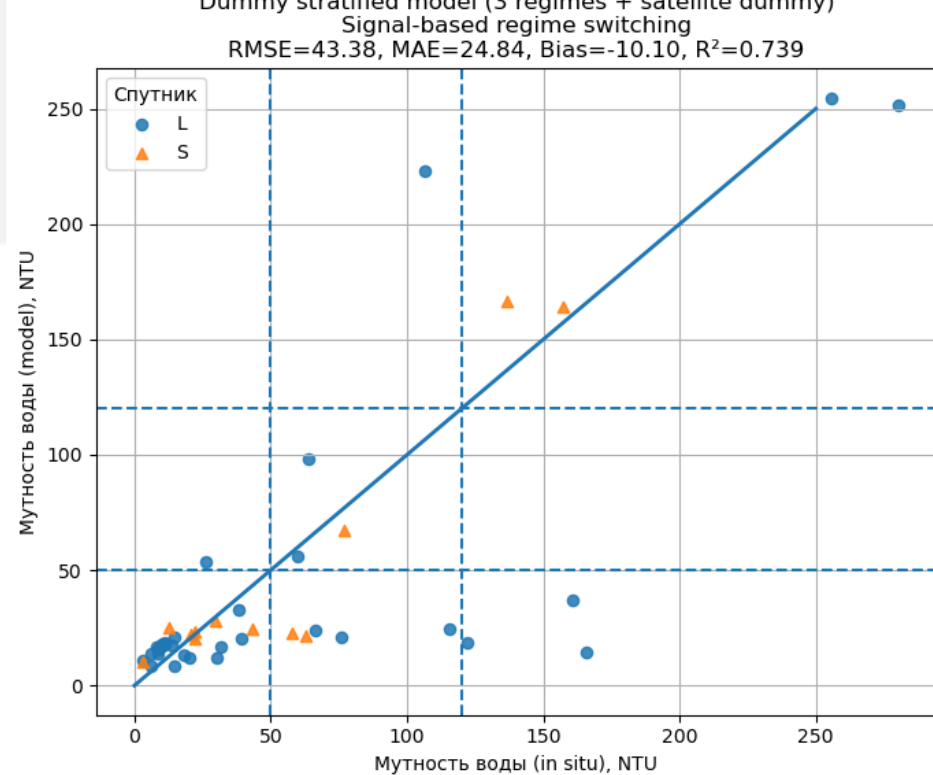
Стратифицированная модель

Для каждого режима мутности $k \in \{LOW, MID, HIGH\}$ строится модель:

$$\ln T = a_k + b_k \ln R_{red} + c_k \ln R_{nir} + d_k I(S),$$

- где индикаторная переменная $I(S)$ задается как:
 - $I(S) = \begin{cases} 1, & \text{если наблюдение получено Sentinel-2,} \\ 0, & \text{если наблюдение получено Landsat.} \end{cases}$
 - где a_k, b_k, c_k — региональные коэффициенты, полученные по совмещённой выборке спутниковых и натурных измерений.
- Переключение режимов основывалось на параметре $\ln(NIR/RED)$.

Спутник	RMSE	MAE	Bias	R2
Landsat	49.3	28.8	-12.3	0.695
Sentinel	19.4	14	-4.04	0.926
L+S	43.38	24.84	-10.10	0.739



Заключение

1. Разработан региональный алгоритм определения мутности воды по спутниковым данным высокого пространственного разрешения (Landsat-8/9, Sentinel-2) на основе лог-линейной зависимости между отражательной способностью и мутностью.
2. Установлено, что стратификация данных по спутниковому сигналу позволяет существенно повысить точность восстановления мутности по сравнению с разбиением по измеренным значениям или модельной оценке.
3. Получено, что наилучшие результаты достигаются при использовании трёх режимов с плавными переходами между ними.
4. Для разработанного алгоритма достигнута точность восстановления мутности для всей выборки: **$R^2 \approx 0.74$**
5. Выявлено, что основная погрешность алгоритма связана с областью высоких значений мутности, что обусловлено неравномерностью обучающей выборки и недостаточным числом наблюдений.
6. Показана возможность совместного использования данных различных спутниковых систем при введении поправочного коэффициента.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (РНФ), проект № 24-17-00182.