Разработка и апробация регионального стратифицированного алгоритма определения мутности воды в приустьевой зоне р. Сулак

П. Д. Жаданова

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: zhadanova.polina@gmail.com

Представлены результаты разработки и первичной апробации регионального алгоритма определения мутности воды в приустьевой зоне р. Сулак по данным сенсоров OLI (Operational Land Imager) Landsat-8, OLI-2 (*англ.* Operational Land Imager-2) Landsat-9 и MSI (*англ.* Multispectral Instrument) Sentinel-2. Региональный подход обусловлен высокой изменчивостью речного выноса и различной эффективностью стандартных алгоритмов в разных оптических условиях. Для разработки использовано 155 квазисинхронных спутниковых и натурных наблюдений по восьми сценам. Разделение на обучающую и тестовую выборку выполнялось на уровне сцен. Региональная перекалибровка моделей Nechad и Dogliotti не улучшила результаты на тестовых данных. Далее была построена логарифмическая модель для трёх режимов мутности. Для оценки точности использованы среднеквадратическая ошибка RMSE (*англ.* root mean square error), средняя абсолютная ошибка MAE (*англ.* mean absolute error), систематическое смещение Bias (*англ.* mean signed error) и коэффициент детерминации R^2. Мутность и ошибки выражены в NTU (*англ.* nephelometric turbidity units). Для автономного применения режим определялся на основе спектрального показателя, рассчитываемого как натуральный логарифм отражательной способности воды в ближнем инфракрасном диапазоне NIR (*англ.* near infrared), с обеспечением плавного смешивания локальных моделей. Итоговая модель обеспечила высокую корреляцию с натурными измерениями, превзойдя Dogliotti по всем четырём рассматриваемым метрикам, а Nechad — по RMSE, MAE и R^2. Пространственное применение алгоритма не создаёт видимых разрывов между режимами и сохраняет структуру речного плюма. Для окончательной оценки переносимости необходимы новые независимые измерения, особенно в высокомутном диапазоне.

Ключевые слова: мутность воды, измерения *in situ*, региональный алгоритм, стратифицированная модель, ACOLITE, Landsat-8/-9, Sentinel-2, Каспийское море, Сулак

Одобрена к печати: 15.10.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-170-182

Введение

Мониторинг приустьевых зон представляет собой важную задачу спутниковой океанологии. Контактные измерения точны, но ограничены по пространственному и временному охвату, тогда как спутниковые данные высокого разрешения позволяют прослеживать распределение речных вод на всей прибрежной акватории (Завьялов и др., 2014; Лаврова и др., 2016).

Для оценки мутности применяются эмпирические и полуэмпирические алгоритмы, основанные на связи оптических характеристик воды со спектральной отражательной способностью. Однако их эффективность зависит от гидрооптических условий, поэтому необходима региональная проверка по квазисинхронным спутниковым и натурным данным (Жаданова, Назирова, 2023; Dogliotti et al., 2015; Maciel, Pedocchi, 2022; Nechad et al., 2009).

Предыдущие исследования показали, что в приустьевой зоне р. Сулак алгоритмы Nechad и Dogliotti работают по-разному в зависимости от условий (Жаданова, Лаврова, 2024; Князев, Жаданова, 2025; Лаврова и др., 2022). Поэтому была поставлена задача разработки регионального подхода, учитывающего смену оптических режимов непосредственно по спутниковым данным.

Район исследования

Бассейн р. Сулак охватывает горные и предгорные районы Большого Кавказа, а также часть Прикаспийской низменности. Река образуется при слиянии Андийского Койсу и Аварского Койсу; её протяжённость составляет 169 км. Сток регулируется каскадом гидротехнических сооружений, включая Чирюртское и Чиркейское водохранилища. Периодические водосбросы, паводковые процессы и изменение объёма поступающей взвеси определяют высокую изменчивость речного выноса. В приустьевой зоне формируется выраженный плюм, хорошо различимый на спутниковых изображениях оптического диапазона (Лаврова и др., 2022; Назирова и др., 2023). Район исследования и расположение гидрологических станций, соответствующих выходу 30.06.2024, представлены на *рис. 1*. В разные годы экспедиционные измерения выполнялись по сходным маршрутам, охватывающим область от устья до внешней части речного плюма.



Рис. 1. Приустьевая зона р. Сулак и расположение гидрологических станций при проведении натурных измерений 30.06.2024

Данные и методы

Натурные измерения и спутниковые данные

В работе использованы результаты экспедиционных исследований, выполненных в приустьевой зоне р. Сулак в 2021–2024 гг. Измерения проводились на гидрологических станциях с борта маломерного судна. Вертикальное распределение мутности оценивалось с помощью CTD-зонда (*англ.* Conductivity, Temperature, Depth) с датчиком Seapoint Turbidity Sensor. В качестве опорных значений использовались измерения мутности приповерхностного слоя портативным турбидиметром TN400 (Apera Instruments) по пробам воды, отобранным с глубины 0,10–0,15 м. Диапазон измерений прибора составляет 0–1000 NTU (*англ.* nephelometric turbidity units), заявленная погрешность — не более ±2 % от измеренного значения. Перед экспедициями выполнялась калибровка по стандартным растворам мутности. Для каждой пробы использовалось среднее двух последовательных измерений.

Глубина на станциях составляла 1,5–10 м. Коррекция донного отражения не проводилась, поэтому возможное влияние дна на мелководных участках учитывалось как источник неопределённости. Для формирования квазисинхронных пар использовались измерения, выполненные в день спутникового пролёта, с временным интервалом 1–4 ч. Спутниковое значение рассчитывалось как среднее отражательной способности в окне 3×3 пикселя с центром в координате станции. Из анализа исключались точки с облачностью, выраженным солнечным бликом и другими артефактами обработки.

В качестве спутниковых данных использовались изображения OLI (*англ*. Operational Land Imager) Landsat-8, OLI-2 (*англ*. Operational Land Imager-2) Landsat-9 и MSI (*англ*. Multispectral Instrument) Sentinel-2A/2B. Для Landsat-8/9 применялись красный канал B4 с длиной волны около 654–655 нм и ближний инфракрасный канал B5 около 864–865 нм, для Sentinel-2 — B4 (665 нм) и B8A (около 865 нм). Пространственное разрешение Landsat составляет 30 м, Sentinel-2 — 10 м для B4 и 20 м для B8A; при обработке данные Sentinel-2 приводились к сетке 10 м.

Предварительная обработка выполнялась в ACOLITE версии 20250114.0. Атмосферная коррекция проводилась методом Dark Spectrum Fitting в режиме tiled с размером тайла 200×200 пикселей (Vanhellemont, 2020). Использовалось встроенное маскирование облачности, отрицательных значений отражательной способности и других некорректных пикселей. После коррекции для станций извлекались значения отражательной способности воды в красном и ближнем инфракрасном диапазонах.

Стандартные алгоритмы определения мутности

В качестве исходных подходов рассматривались алгоритмы Nechad и Dogliotti, реализованные в ACOLITE. В основе обоих алгоритмов лежит полуэмпирическая зависимость

$$T = \frac{A\rho_w(\lambda)}{1-\rho_w(\lambda)/C},$$

где T — мутность воды, NTU; $\rho_w(\lambda)$ — отражательная способность воды на длине волны λ; A и C — калибровочные коэффициенты. В алгоритме Nechad используется один спектральный диапазон. Алгоритм Dogliotti предусматривает переход от красного к ближнему инфракрасному диапазону при увеличении мутности, что позволяет отодвинуть порог насыщения сигнала (Dogliotti et al., 2015; Nechad et al., 2009, 2015).

Обобщение данных за весь период наблюдений показывает, что оба алгоритма сохраняют связь с измерениями *in situ*, но имеют разные ограничения (*рис. 2*). Для Nechad динамический диапазон ограничивается насыщением красного канала, тогда как для Dogliotti характерен заметный разброс, в том числе при низкой и средней мутности. Таким образом, ни один из алгоритмов не обеспечивает одинаково устойчивого результата во всём диапазоне условий, наблюдаемых у р. Сулак.

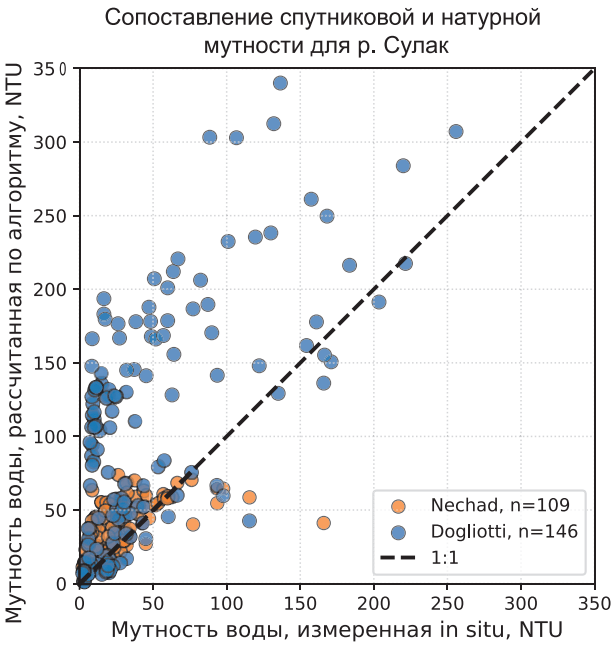


Рис. 2. Сопоставление значений мутности воды, рассчитанных по алгоритмам Nechad и Dogliotti, с данными *in situ* за весь период наблюдений, *n* — число станций

Формирование обучающей и тестовой выборки

Исходный массив включал 155 наблюдений по восьми сценам Landsat-8/9 и Sentinel-2. После фильтрации использовалось 148 наблюдений: 122 в обучающей и 26 в тестовой выборке (*табл. 1*). Разделение выполнялось на уровне целых сцен, что исключало утечку информации.

Обучающая выборка охватывала мутность 3,1–743,6 NTU, тестовая — 2,1–559,6 NTU и включала по одной сцене Landsat-9 и Sentinel-2. Тестовые сцены были выбраны до подбора коэффициентов итоговой модели. При этом выборка не является полностью независимой в перспективном смысле, поскольку все наблюдения были получены до завершения разработки алгоритма. Все алгоритмы оценивались на одной тестовой выборке по среднеквадратической ошибке RMSE (*англ*. root mean square error), средней абсолютной ошибке MAE (*англ*. mean absolute error), систематическому смещению Bias (*англ*. mean signed error) и коэффициенту детерминации R^2.

Таблица 1. Состав обучающей и тестовой выборки

Дата	Спутниковая система	Выборка	Число наблюдений	Диапазон мутности *in situ*, NTU
20.05.2021	Landsat	обучающая	37	4,9–75,4
23.05.2021	Sentinel-2		19	12,7–62,9
08.06.2022	Landsat		19	5,0–137,0
04.06.2023	Landsat		27	12,0–203,5
05.06.2023	Sentinel-2		9	23,1–136,5
29.06.2024	Landsat		11	3,1–743,6
04.07.2024	Sentinel-2	тестовая	14	2,1–220,0
30.06.2024	Landsat		12	3,3–559,6

Построение региональных моделей

Региональная адаптация моделей типа Nechad и Dogliotti

На первом этапе выполнялась региональная калибровка моделей типа Nechad и Dogliotti. Калибровочный диапазон ограничивался мутностью до 750 NTU, а коэффициенты подбирались посредством минимизации расхождений между расчётными и натурными значениями на обучающих сценах. Полученные коэффициенты регионально откалиброванных моделей приведены в *табл. 2*. Этот этап позволил проверить, достаточно ли заменить коэффициенты при сохранении исходной функциональной формы алгоритмов.

Таблица 2. Коэффициенты регионально откалиброванных моделей типа Nechad и Dogliotti

Модель	Спектральный диапазон	*A*	*C*
Nechad	Red	221,4	0,176
Dogliotti	Red	308,7	27599,7
Dogliotti	NIR	986,6	0,245

Примечание: Обозначения Red и NIR соответствуют красному (*англ*. red) и ближнему инфракрасному (*англ*. near infrared) диапазонам.

Следует отметить, что при региональной калибровке модели типа Dogliotti параметр C_{Red} принял большое значение. Анализ чувствительности показал, что при $C_{\mathrm{Red}} \geqslant 10$ изменение данного коэффициента практически не влияет на ошибку модели, что соответствует приближению красноканальной ветви к линейной зависимости.

Стратифицированная модель

Анализ спектральных характеристик и ошибок позволил выделить три режима мутности: LOW (*англ.* low) — низкая мутность ($T < 50$ NTU), MID (*англ.* middle) — средняя мутность ($50 \leqslant T < 120$ NTU) и HIGH (*англ.* high) — высокая мутность ($T \geqslant 120$ NTU) — с рабочими границами 50 и 120 NTU. Разделение по натурным значениям использовалось только на этапе построения модели для проверки эффективности раздельного описания оптических режимов и не предназначалось для оперативного применения. Границы были выбраны эмпирически до оценки на тестовой выборке с учётом результатов предыдущих исследований и характера спектральных зависимостей в красном и ближнем инфракрасном диапазонах.

В обучающей выборке режимы LOW, MID и HIGH были представлены 85, 23 и 14 наблюдениями соответственно, в тестовой — 12, 4 и 10.

Для каждого режима $k \in \{\mathrm{LOW}, \mathrm{MID}, \mathrm{HIGH}\}$ строилась модель:

$$\ln T = a_k + b_k \ln \rho_w(\mathrm{Red}) + c_k \ln \rho_w(\mathrm{NIR}) + d_k I_{\mathrm{S2}},$$

где $I_{\mathrm{S2}} = 1$ для наблюдений Sentinel-2 и $I_{\mathrm{S2}} = 0$ для Landsat-8/9; a_k, b_k, c_k и d_k — коэффициенты локальной модели. Коэффициент d введён как индикаторная поправка для учёта систематических различий между наблюдениями Sentinel-2 и Landsat-8/9 в пределах имеющейся обучающей выборки. Поскольку данные Sentinel-2 в обучении представлены двумя спутниковыми сценами, данный коэффициент может также частично отражать особенности отдельных сцен и условий наблюдений.

Автономное переключение режимов

Для автономного применения режим выбирался без использования натурной мутности — по спектральному показателю, рассчитанному из спутниковых данных. В качестве критерия был принят спектральный показатель $S = \ln \rho_w(\mathrm{NIR})$. Значения *in situ* использовались только при обучении локальных моделей и настройке переключателя.

Пороговые значения S_i определялись как медианы спектрального показателя в заданных диапазонах мутности; при недостатке наблюдений интервалы расширялись. Использование медианы снижало влияние выбросов.

Полуширина переходных областей также определялась по данным. Для каждой границы вычислялась половина межквартильного размаха спектрального сигнала:

$$W = \frac{Q_{75}(S) - Q_{25}(S)}{2},$$

где W — полуширина переходной области между соседними режимами; S — используемый спутниковый спектральный сигнал; $Q_{25}(S)$ и $Q_{75}(S)$ — соответственно 25-й и 75-й процентили распределения спектрального сигнала S в окрестности заданной границы мутности.

В итоговой версии алгоритма параметры переключения составили $S_1 = -3{,}08$, $S_2 = -2{,}88$, $W_1 = 0{,}43$ и $W_2 = 0{,}24$. Чтобы избежать скачкообразного изменения рассчитанной мутности при пересечении порогов, использовалось плавное смешивание прогнозов соседних моделей. Функция $\mathrm{clip}(x, 0, 1)$ ограничивает значение веса интервалом от 0 до 1. Вес перехода от LOW к MID ω_1 и вес подключения модели HIGH ω_2 рассчитывались как

$$\omega_1 = \mathrm{clip}\left(\frac{S - (S_1 - W_1)}{2W_1}, 0, 1\right), \quad \omega_2 = \mathrm{clip}\left(\frac{S - (S_2 - W_2)}{2W_2}, 0, 1\right).$$

При полученных значениях параметров переходные области LOW–MID и MID–HIGH частично перекрываются. Перекрытие не приводит к неоднозначности результата, поскольку смешивание выполняется последовательно: сначала формируется промежуточный прогноз мутности воды LOW–MID после чего он смешивается с прогнозом HIGH. Поэтому в обла-

сти перекрытия итоговая оценка представляет собой однозначно определённую комбинацию всех трёх локальных моделей. Окончательная оценка мутности определялась как последовательное смешивание прогнозов локальных моделей:

$$T = (1-\omega_2)(1-\omega_1)T_{\mathrm{LOW}} + (1-\omega_2)\omega_1 T_{\mathrm{MID}} + \omega_2 T_{\mathrm{HIGH}}.$$

При низких значениях S основной вклад в результат вносит модель LOW, в среднем диапазоне — MID, а при высоких значениях — HIGH. В переходных областях прогноз представляет собой взвешенную комбинацию соседних моделей, благодаря чему в пространственных полях мутности не возникают искусственные разрывы.

Результаты и обсуждение

Стандартные алгоритмы

На тестовой выборке для алгоритма Nechad получены RMSE = 95,91 NTU, MAE = 52,37 NTU, Bias = –22,70 NTU и $R^2 = 0{,}441$ (*рис. 3*). В области низкой и умеренной мутности часть расчётных значений располагается вблизи линии 1:1, однако с увеличением мутности возникает выраженное занижение. Отрицательное значение Bias также указывает на общее систематическое недооценивание мутности.

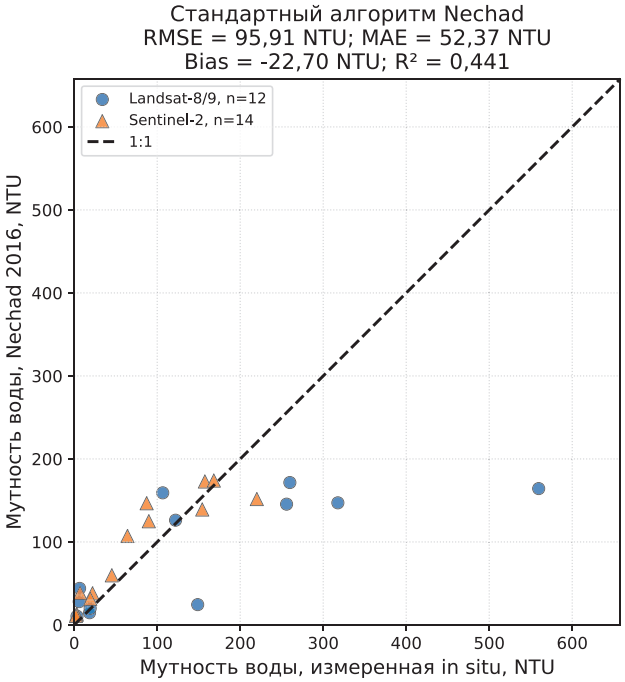


Рис. 3. Сопоставление мутности, рассчитанной по стандартному алгоритму Nechad, с измерениями *in situ* на тестовой выборке

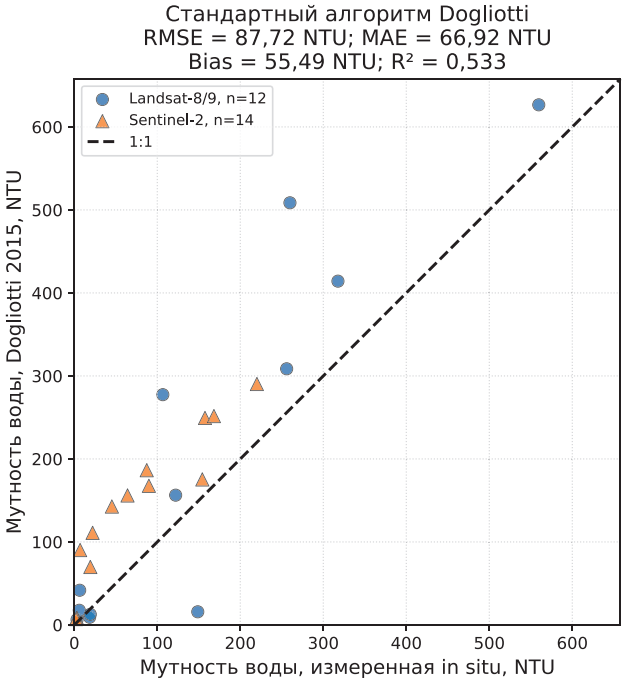


Рис. 4. Сопоставление мутности, рассчитанной по стандартному алгоритму Dogliotti, с измерениями *in situ* на тестовой выборке

Для алгоритма Dogliotti получены RMSE = 87,72 NTU, MAE = 66,92 NTU, Bias = 55,49 NTU и $R^2 = 0{,}533$ (*рис. 4*). По сравнению с Nechad алгоритм лучше воспроизводит общий рост мутности и характеризуется меньшим RMSE и более высоким коэффициентом детерминации. Вместе с тем положительный Bias свидетельствует о систематическом завышении расчётных значений, особенно в области средней и высокой мутности.

Сами по себе оба стандартных алгоритма дали для рассматриваемых сцен сравнительно неплохие, хотя и неодинаковые результаты. Алгоритм Dogliotti показал наименьший RMSE и более высокий R^2, а Nechad — меньшие значения MAE и абсолютное систематическое сме-

щение. Иными словами, алгоритмы характеризуются противоположным знаком ошибки и по-разному работают в отдельных частях диапазона. Именно это, а не полная неработоспособность стандартных подходов, послужило основанием для поиска адаптивной региональной схемы.

Результаты региональной адаптации

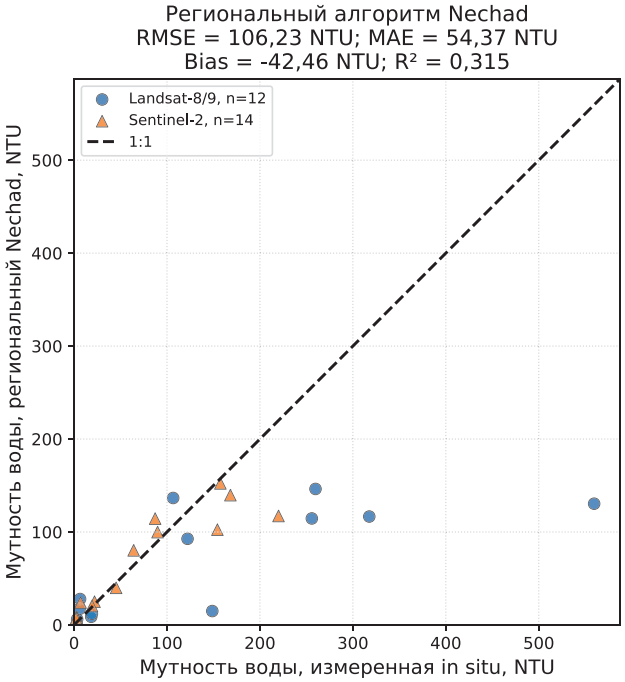


Рис. 5. Результаты региональной адаптации модели типа Nechad: сопоставление расчётных и натурных значений

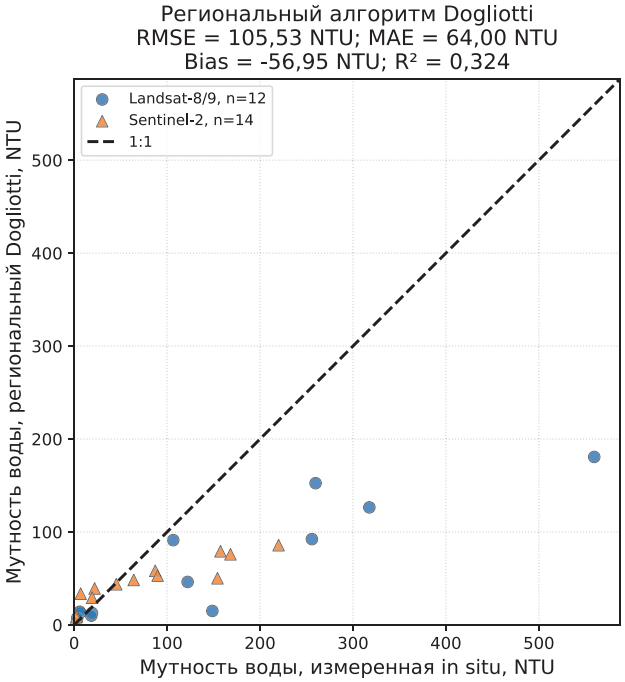


Рис. 6. Результаты региональной адаптации модели типа Dogliotti: сопоставление расчётных и натурных значений

Простая региональная перекалибровка не привела к улучшению показателей на тестовых сценах. Для модели типа Nechad получены RMSE = 106,23 NTU, MAE = 54,37 NTU, Bias = –42,46 NTU и $R^2 = 0{,}315$ (*рис. 5*). При низкой и умеренной мутности точки располагаются сравнительно близко к линии 1:1, однако с увеличением мутности расхождение резко возрастает.

Региональная модель типа Dogliotti показала несколько лучшие результаты: RMSE = 105,53 NTU, MAE = 64,00 NTU, Bias = –56,95 NTU и $R^2 = 0{,}324$ (*рис. 6*). Тем не менее она также систематически недооценивала высокие значения мутности.

Региональная корректировка коэффициентов не устранила ограничения моделей и ухудшила их метрики на тестовых сценах, что показало необходимость более гибкого подхода с учётом смены спектрального отклика. В региональной модели Dogliotti границы перехода между красным и ближним инфракрасным диапазонами сохранялись равными $\rho_1 = 0{,}05$ и $\rho_2 = 0{,}07$.

Стратификация по данным in situ

Промежуточная стратифицированная модель, в которой режим задавался по фактической мутности, обеспечила RMSE = 67,47 NTU, MAE = 36,98 NTU, Bias = –27,67 NTU и $R^2 = 0{,}724$ (*рис. 7*). Это лучшие значения RMSE, MAE и R^2 среди рассмотренных вариантов. Наиболее близкое соответствие расчётных и измеренных значений наблюдается при низкой мутности. В среднем диапазоне разброс увеличивается, но общая зависимость сохраняется. При высокой мутности модель по-прежнему преимущественно занижает значения.

Этот вариант нельзя применять автономно, поскольку для выбора режима требуется уже известная мутность. Вместе с тем он подтверждает основную гипотезу работы: использование отдельных локальных зависимостей лучше описывает смену оптических условий, чем единая регионально откалиброванная функция.

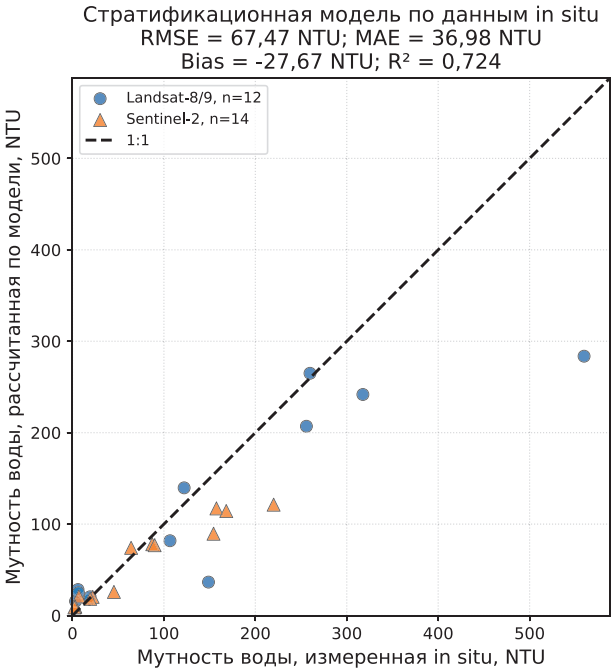


Рис. 7. Результаты промежуточной стратифицированной модели с разделением режимов по данным *in situ* и учётом спутниковой системы

Автономное определение режима

Для диагностики переключателя фактический диапазон мутности сопоставлялся с режимом, выбранным только по $S = \ln \rho_w(\mathrm{NIR})$. Общая точность жёсткой классификации составила 76,9 % (*рис. 8*). Все 12 наблюдений LOW были распознаны правильно. Для HIGH корректно классифицированы 7 из 10 наблюдений. Наибольшие затруднения возникли для MID: из четырёх наблюдений только одно было отнесено к правильному режиму, два — к LOW и одно — к HIGH.

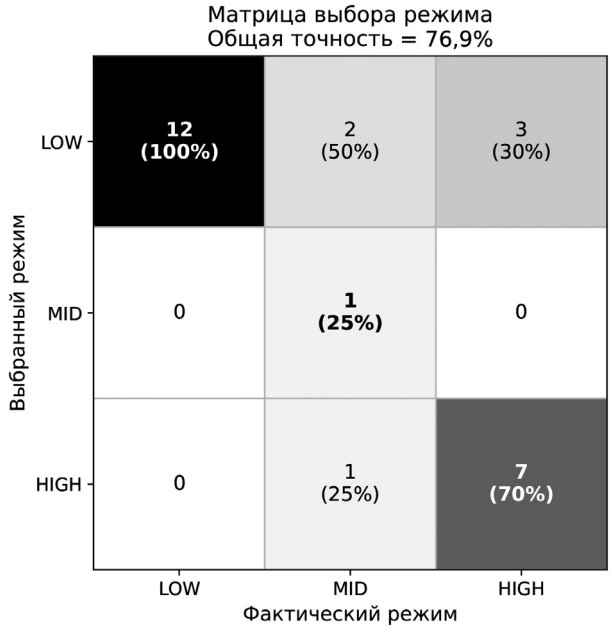


Рис. 8. Матрица ошибок автономного выбора режима по показателю $S = \ln \rho_w(\mathrm{NIR})$

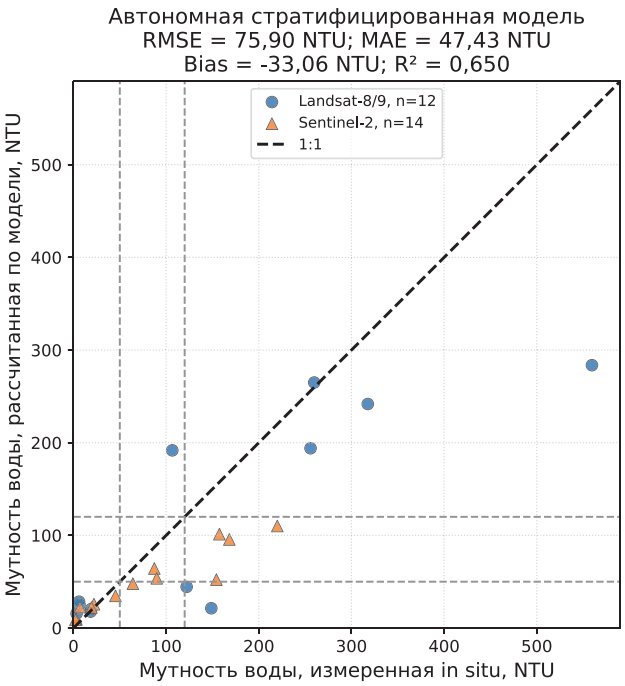


Рис. 9. Сопоставление мутности, рассчитанной по автономной стратифицированной модели, с данными *in situ*

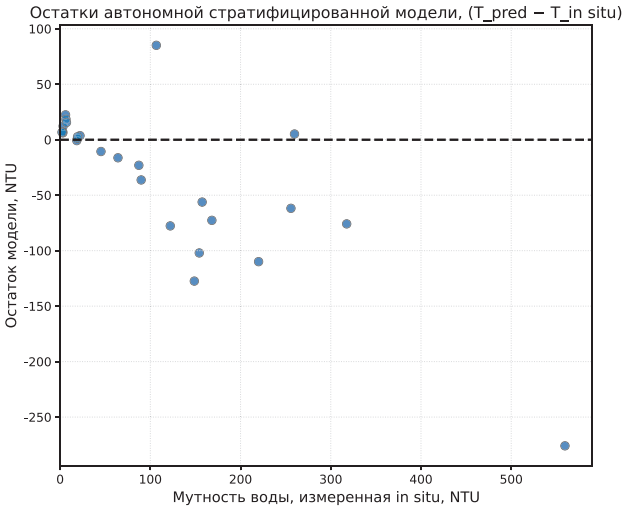


Рис. 10. Зависимость остатков автономной модели от мутности, измеренной *in situ*

Матрица характеризует только диагностическое жёсткое присвоение режима. В итоговом алгоритме в окрестности S_1 и S_2 используется плавное смешивание, поэтому ошибка классификации в переходной области не означает автоматического выбора одной неверной локальной модели. Тем не менее результаты показывают, что крайние диапазоны разделяются устойчивее, а неопределённость максимальна для MID из-за перекрытия спектральных характеристик.

Для автономной модели получены RMSE = 75,90 NTU, MAE = 47,43 NTU, Bias = –33,06 NTU и $R^2 = 0{,}650$ (*рис. 9*, *10*). Большая часть наблюдений низкой и средней мутности располагается вблизи линии 1:1, тогда как отдельные высокомутные значения существенно занижаются.

Коэффициенты локальных моделей представлены в *табл. 3*. При низкой и средней мутности вклад красного канала положителен, а NIR — отрицателен; при высокой мутности оба коэффициента становятся положительными, причём роль NIR-сигнала возрастает. Коэффициент *d* учитывает систематические различия между Sentinel-2 и Landsat-8/9.

Таблица 3. Коэффициенты локальных моделей для режимов мутности

Режим	*a*	*b*	*c*	*d*
LOW	3,98	1,01	–0,43	0,30
MID	5,47	0,82	–0,21	–0,08
HIGH	7,52	0,13	0,71	–0,50

Промежуточная модель использует фактическую мутность для выбора режима, тогда как автономная определяет его по спутниковому признаку. Автономный вариант превосходит регионально откалиброванные модели Nechad и Dogliotti по всем метрикам. По сравнению со стандартным Dogliotti он имеет меньшие RMSE, MAE и Bias и более высокий R^2, а стандартному Nechad уступает только по Bias (*табл. 4*). При этом отдельные высокомутные значения по-прежнему занижаются.

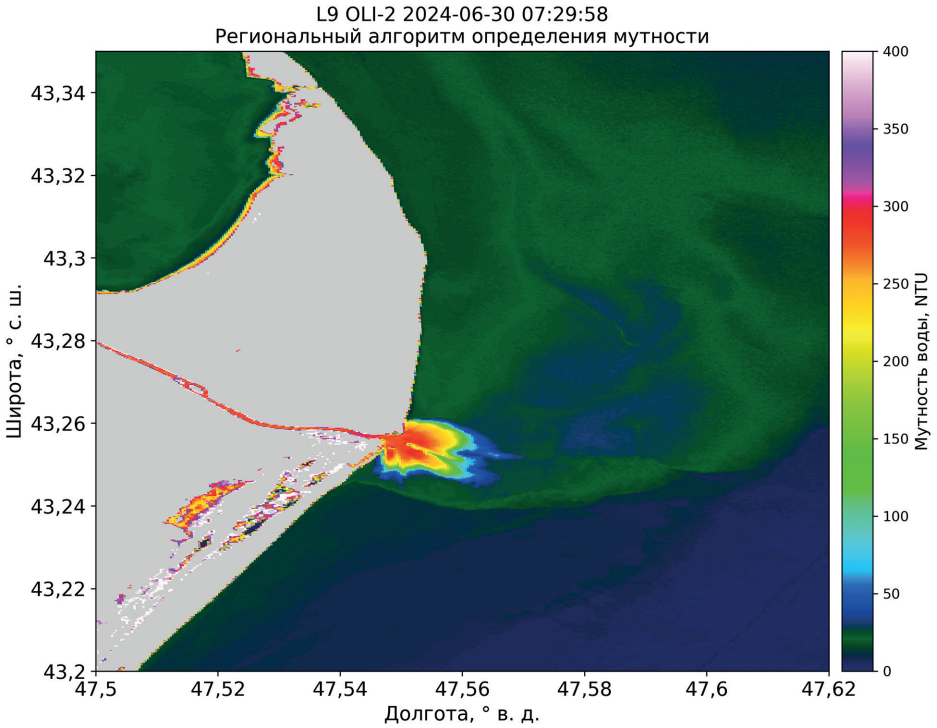


Рис. 11. Поле распределения мутности воды, рассчитанное по автономной стратифицированной модели для сцены Landsat-9 от 30 июня 2024 г.

На *рис. 11* показано поле мутности для сцены Landsat-9 от 30 июня 2024 г. Переходы между режимами происходят плавно, без искусственных разрывов, при сохранении структуры речного плюма. Максимальная мутность наблюдается вблизи устья и уменьшается по направлению к открытому морю. Поскольку в этой области преобладает слабо представленный в обучающей выборке режим HIGH, абсолютные значения требуют дополнительной проверки по независимым измерениям.

Для оценки устойчивости к выбору границ режимов были дополнительно рассмотрены варианты 40/100 и 60/150 NTU. В каждом случае локальные модели и параметры переключения заново рассчитывались по обучающей выборке и оценивались на той же тестовой выборке. При границах 40/100 NTU RMSE и MAE увеличились на 5,9 и 10,6 %, а точность выбора режима снизилась до 57,7 %. При 60/150 NTU RMSE уменьшился на 12,9 %, MAE — на 19,1 %, R^2 вырос с 0,650 до 0,735, однако точность выбора режима снизилась до 73,1 %, а число обучающих наблюдений HIGH — до девяти.

Несмотря на улучшение части метрик при 60/150 NTU, границы 50/120 NTU были сохранены, поскольку их замена по результатам тестовой выборки означала бы донастройку модели по тестовым данным. Поэтому эти расчёты рассматриваются как анализ чувствительности, а не как оптимизация порогов.

Таблица 4. Сравнение точности алгоритмов на тестовой выборке

Модель	RMSE, NTU	MAE, NTU	Bias, NTU	R^2
Nechad	95,91	52,37	−22,70	0,441
Dogliotti	87,72	66,92	55,49	0,533
Региональный Nechad	106,23	54,37	−42,46	0,315
Региональный Dogliotti	105,53	64,00	−56,95	0,324
Стратификация по *T in situ*	67,47	36,98	−27,67	0,724
Автономная стратификация	75,90	47,43	−33,06	0,650

Ограничения алгоритма

Основное ограничение алгоритма связано с неравномерностью выборки: высокомутный диапазон представлен меньшим числом наблюдений, что снижает устойчивость коэффициентов режима HIGH и повышает влияние отдельных точек на метрики. Для Sentinel-2 также доступно меньше квазисинхронных высокомутных измерений, поэтому более надёжная оценка коэффициента d требует расширения выборки и увеличения числа сцен обоих сенсоров.

Дополнительную неопределённость вносят различия гранулометрического и минерального состава взвеси, поскольку одинаковым значениям NTU могут соответствовать разные спектральные характеристики. В работе эти различия учитываются лишь косвенно через региональную калибровку и разделение на режимы.

Тестовая выборка отделена от обучающей на уровне сцен, но не является полностью независимой перспективной выборкой, поэтому результаты следует рассматривать как первичную апробацию. Для окончательной оценки переносимости необходимы новые квазисинхронные измерения, особенно при $T \geqslant 120$ NTU, а также проверка устойчивости порогов S_1 и S_2. Эмпирически выбранные границы режимов в дальнейшем требуют оптимизации на расширенной выборке и независимой межсценовой проверке.

Заключение

В работе разработан региональный стратифицированный алгоритм определения мутности воды в приустьевой зоне р. Сулак по данным Landsat-8/9 и Sentinel-2. Стандартные алгоритмы Nechad и Dogliotti показали взаимодополняющие результаты: Nechad имел меньшие MAE и Bias, а Dogliotti — меньший RMSE и более высокий R^2. Простая региональная перекалибровка не улучшила их работу на тестовых сценах.

Разделение наблюдений на три режима позволило лучше учесть нелинейность спектрального отклика. При задании режима по данным *in situ* получены RMSE = 67,47 NTU, MAE = 36,98 NTU, Bias = −27,67 NTU и $R^2 = 0{,}724$. Автономная схема переключения по показателю $S = \ln \rho_w(\mathrm{NIR})$ обеспечила RMSE = 75,90 NTU, MAE = 47,43 NTU, Bias = −33,06 NTU и $R^2 = 0{,}650$, превзойдя стандартный Dogliotti по всем четырём метрикам и Nechad — по RMSE, MAE и R^2 (*табл. 4*).

Результаты показывают перспективность адаптивного перехода между локальными зависимостями для оптически изменчивых вод р. Сулак. Такой подход сохраняет структуру речного плюма без видимых разрывов между режимами. Дальнейшая работа связана с расширением независимой выборки, уточнением границ режимов и проверкой алгоритма на новых спутниковых сценах.

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

Литература

1. *Завьялов П.О.*, *Маккавеев П.Н.*, *Коновалов Б.В. и др.* Гидрофизические и гидрохимические характеристики морских акваторий у устьев малых рек российского побережья Черного моря // Океанология. 2014. Т. 54. № 3. С. 293–308. DOI: 10.7868/S0030157414030150.
2. *Жаданова П.Д.*, *Лаврова О.Ю.* Влияние выбора данных спутников Landsat-8/9 и Sentinel-2A/2B на результаты определения мутности воды в приустьевых зонах рек // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 3. С. 244–265. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-244-265.
3. *Жаданова П.Д.*, *Назирова К.Р.* Анализ и верификация алгоритмов определения мутности и концентрации взвешенного вещества, имплементированных в программный комплекс ACOLITE

// Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 5. С. 50–68. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-50-68.
4. *Князев Н.А.*, *Жаданова П.Д.* Сравнение результатов определения полей мутности и концентрации взвешенного вещества для рек Мзымты, Сулак и Терек по спутниковым данным и натурным измерениям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 1. С. 244–258. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-244-258.
5. *Лаврова О.Ю.*, *Митягина М.И.*, *Костяной А.Г.* Спутниковые методы выявления и мониторинга зон экологического риска морских акваторий. М.: ИКИ РАН, 2016. 336 с.
6. *Лаврова О.Ю.*, *Назирова К.Р.*, *Алферьева Я.О. и др.* Сопоставление параметров плюмов рек Сулак и Терек на основе спутниковых данных и измерений *in situ* // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 5. С. 264–283. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-264-283.
7. *Назирова К.Р.*, *Лаврова О.Ю.*, *Алферьева Я.О.*, *Князев Н.А.* Пространственно-временная изменчивость плюмов рек Терек и Сулак по спутниковым данным и синхронным натурным измерениям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 5. С. 285–303. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-285-303.
8. *Dogliotti A.I.*, *Ruddick K.G.*, *Nechad B. et al.* A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters // Remote Sensing of Environment. 2015. V. 156. P. 157–168. DOI: 10.1016/j.rse.2014.09.020.
9. *Maciel F.P.*, *Pedocchi F.* Evaluation of ACOLITE atmospheric correction methods for Landsat-8 and Sentinel-2 in the Río de la Plata turbid coastal waters // Intern. J. Remote Sensing. 2022. V. 43. P. 215–240. DOI: 10.1080/01431161.2021.2009149.
10. *Nechad B.*, *Ruddick K.G.*, *Neukermans G.* Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of turbidity in coastal waters // Proc. SPIE. Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, and Large Water Regions. 2009. V. 7473. Article 74730H. 11 p. DOI: 10.1117/12.830700.
11. *Nechad B.*, *Ruddick K.*, *Schroeder T. et al.* CoastColour Round Robin datasets: a database to evaluate the performance of algorithms for the retrieval of water quality parameters in coastal waters // Earth System Science Data. 2015. V. 7. P. 319–348. DOI: 10.5194/essd-7-319-2015.
12. *Vanhellemont Q.* Sensitivity analysis of the dark spectrum fitting atmospheric correction for metre- and decametre-scale satellite imagery using autonomous hyperspectral radiometry // Optics Express. 2020. V. 28. P. 29948–29965. DOI: 10.1364/OE.397456.

Development and initial testing of a regional stratified algorithm for water turbidity determination in the Sulak River mouth area

P.D. Zhadanova

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: zhadanova.polina@gmail.com

The results of the development and initial testing of a regional algorithm for water turbidity retrieval in the Sulak River mouth area using data from the Operational Land Imager (OLI) on Landsat-8, Operational Land Imager-2 (OLI-2) on Landsat-9, and Multispectral Instrument (MSI) on Sentinel-2 are presented. The regional approach is motivated by the high variability of river discharge and the differing performance of standard algorithms under different optical conditions. A total of 155 quasi-synchronous satellite and in situ observations from eight scenes were used. Training and test datasets were separated at the scene level. Regional recalibration of the Nechad and Dogliotti models did not improve their performance on the test data. A logarithmic model for three turbidity regimes was then developed. Accuracy was assessed using the root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE), mean signed error (Bias), and coefficient of determination (R^2). For autonomous application, the regime was determined based on a spectral indicator calculated as the natural logarithm of the water reflectance in the near-infrared, with smooth blending of local models. The final model showed a high correlation with field measurements, outperforming Dogliotti on all four metrics considered, and Nechad on RMSE, MAE, and R^2, outperforming Dogliotti in all four metrics

and Nechad in RMSE, MAE, and R^2. Spatial application of the algorithm produced no visible discontinuities between regimes and preserved the structure of the river plume. Further independent measurements, especially in the high-turbidity range, are required for a final assessment of the algorithm's transferability.

Keywords: water turbidity, *in situ* measurements, regional algorithm, stratified model, ACOLITE, Landsat-8/9, Sentinel-2, Caspian Sea, Sulak River

Accepted: 15.10.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-170-182

References

1. Zavialov P.O., Makkaveev P.N., Konovalov B.V. et al., Hydrophysical and hydrochemical characteristics of the sea areas adjacent to the estuaries of small rivers of the Russian coast of the Black Sea, *Oceanology*, 2014, V. 54, No. 3, pp. 265–280, DOI: 10.1134/S0001437014030151.
2. Zhadanova P.D., Lavrova O.Yu., Impact of Landsat-8/9 and Sentinel-2A/2B data selection on the results of water turbidity determination in coastal river zones, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 3, pp. 244–265 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-244-265.
3. Zhadanova P.D., Nazirova K.R., Analysis and verification of turbidity and suspended solids concentration determination algorithms implemented in the ACOLITE software package, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, V. 20, No. 5, pp. 50–68 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-50-68.
4. Knyazev N.A., Zhadanova P.D., Comparison of the results of turbidity and suspended matter concentration field determination for the Mzymta, Sulak and Terek rivers based on satellite data and *in situ* measurements, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2025, V. 22, No. 1, pp. 244–258 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-244-258.
5. Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., Kostianoy A.G., *Sputnikovye metody vyyavleniya i monitoringa zon ehkologicheskogo riska morskikh akvatorii* (Satellite methods for detecting and monitoring marine zones of ecological risk), Moscow: IKI RAN, 2016, 336 p. (in Russian).
6. Lavrova O.Yu., Nazirova K.R., Alferyeva Ya.O. et al., Comparison of plume parameters of the Sulak and Terek rivers based on satellite data and *in situ* measurements, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 5, pp. 264–283 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-264-283.
7. Nazirova K.R., Lavrova O.Yu., Alferyeva Ya.O., Knyazev N.A., Spatiotemporal plume variability of Terek and Sulak rivers from satellite data and concurrent *in situ* measurements, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, V. 20, No. 5, pp. 285–303 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-285-303.
8. Dogliotti A.I., Ruddick K.G., Nechad B. et al., A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters, *Remote Sensing of Environment*, 2015, V. 156, pp. 157–168, DOI: 10.1016/j.rse.2014.09.020.
9. Maciel F.P., Pedocchi F., Evaluation of ACOLITE atmospheric correction methods for Landsat-8 and Sentinel-2 in the Río de la Plata turbid coastal waters, *Intern. J. Remote Sensing*, 2022, V. 43, pp. 215–240, DOI: 10.1080/01431161.2021.2009149.
10. Nechad B., Ruddick K.G., Neukermans G., Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of turbidity in coastal waters, *Proc. SPIE. Remote Sensing of the Ocean*, *Sea Ice*, *and Large Water Regions*, 2009, V. 7473, Article 74730H, 11 p., DOI: 10.1117/12.830700.
11. Nechad B., Ruddick K., Schroeder T. et al., CoastColour Round Robin datasets: a database to evaluate the performance of algorithms for the retrieval of water quality parameters in coastal waters, *Earth System Science Data*, 2015, V. 7, pp. 319–348, DOI: 10.5194/essd-7-319-2015.
12. Vanhellemont Q., Sensitivity analysis of the dark spectrum fitting atmospheric correction for metre- and decametre-scale satellite imagery using autonomous hyperspectral radiometry, *Optics Express*, 2020, V. 28, pp. 29948–29965, DOI: 10.1364/OE.397456.