







Научная статья

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДИСТАНЦИОННЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ОПТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ В ВОДОЕМАХ АЛМАТИНСКОЙ ОБЛАСТИ

Равиль И. Мухамедиев^{1,2}, д.инж.н., Валентин В. Смургин¹, Кирилл Д. Гизатулин¹, Адилхан Сымагулов^{1,2}, Алексей Г. Терехов^{2,3}, к.т.н., Елена Л. Мухамедиева^{1,2}, Фарида Н. Абдолдина¹, к.т.н.

¹ НАО «Казахский Национальный исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева» (Satbayev University), Алматы, Казахстан; ravil.muhamedyev@gmail.com (Р.И.М.), valentinsmurgin@gmail.com (В.В.С.), gkd.030201@gmail.com (К.Д.Г.), asmogulove00@gmail.com (А.С.), abdoldinafarida@gmail.com (Ф.Н.А.).

² Институт информационных и вычислительных технологий КН МНВО РК, Алматы, Казахстан; muhamedijeva@gmail.com (Е.Л.М.)

³ РГП «Казгидромет», Алматы, Казахстан; aterekhov1@yandex.ru (А.Г.Т.)

Автор корреспонденции: Фарида Н. Абдолдина, abdoldinafarida@gmail.com

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Оптически активные компоненты, Озеро Сорбулак, Загрязненность воды, Дистанционный мониторинг, Беспилотный летательный аппарат (БПЛА)

АБСТРАКТ

В работе описывается набор данных, полученный в ходе полевых экспедиций к озеру Сорбулак и водохранилищу Капчагай. На указанных водоемах произведены облеты в прибрежной зоне с применением БПЛА, оснащенного мультиспектральной камерой. Рассчитаны и картированы спектральные индексы обеспечивающие выявление водной поверхности и наличие в водоемах оптически активных компонентов на основе спутниковых продуктов (MNDWI, NDCI, NDMI, NDWI, NDTI, WRI) и изображений, полученных с борта БПЛА (NDWI, NDCI, WRI, NDTI). Выполнено сравнение качества оценки загрязненности озера оптически активными компонентами с применением спутниковых снимков и снимков полученных с борта БПЛА. Показано, что загрязненность прибрежной зоны озера Сорбулак (мутность и содержание хлорофилла) в несколько раз выше, чем водохранилища Капчагай. БПЛА демонстрируют большую детализацию в малых масштабах, способны выполнять мониторинг с высоким темпоральным и пространственным разрешением. Однако малогабаритные мультиспектральные камеры устанавливаемые на борту БПЛА обладают ограничениями по числу спектральных каналов. БПЛА ограничены и по масштабу выполняемого мониторинга. С другой стороны, спутниковый мониторинг отличается большими масштабами, большим числом спектральных каналов даже в бесплатной версии спутниковых продуктов и, в тоже время, намного меньшим пространственным и временным разрешением. Очевидно, что сочетание возможностей присущих обеим технологиям может повысить качество и оперативность мониторинга крупных водных объектов в зонах существенного антропогенного влияния.

1. ВВЕДЕНИЕ

Научное сообщество проявляет значительный интерес к вопросам использования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в области экологического мониторинга [1]. Значительное число статей посвящено мониторингу дорожного движения [2] и оценке качества воздуха по содержанию CO, O₃, NO, двуокиси азота NO₂, сжиженного природного газа, H₂, метана, PM_{2.5}, летучих органических соединений (VOC), CO₂, SO₂, CO, температуры, влажности, NH₃, PM₁₀ [3...6], мониторинга, вертикального [7] и пространственного распределения пылевых частиц

По статье:

Получено: 16.08.2025

Пересмотрено: 09.03.2026

Принято: 10.03.2026

Опубликовано: 01.04.2026

Для цитирования:

Мухамедиев Р., Смурыгин В., Гизатулин К., Сымагулов А., Терехов А., Мухамедиева Е., Абдолдина Ф. Сравнительный анализ дистанционных методов контроля оптически активных компонентов в водоемах Алматинской области // Гидрометеорология и экология, 121 (1), 2026, 24-42.

[8...9]. Рост публикационной активности наблюдается и в сфере контроля полигонов твердых бытовых отходов (ТБО) [10], шума [11] и загрязненности воды [12]. Рисунок 1 иллюстрирует изменения в количестве статей с определенным сочетанием ключевых терминов за десятилетний период.

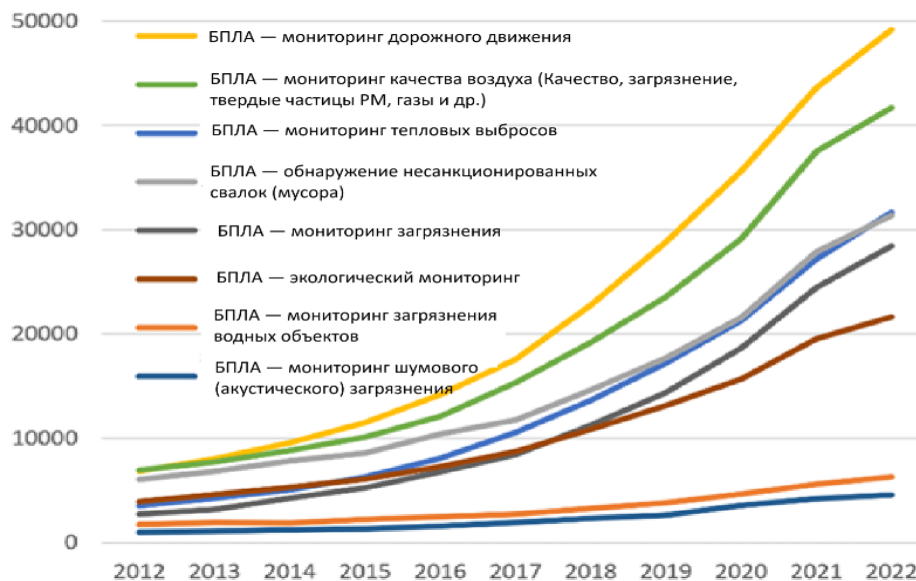


Рисунок 1. Динамика публикационной активности по направлениям экологического мониторинга

Мониторинг загрязненности водных объектов включает контроль химических и термических загрязнений, мутности, загрязненности растительностью, нефтью, микропластиком, металлами и другими отходами связанным с промышленной или сельскохозяйственной деятельностью. Многие из указанных загрязнителей выявляются лабораторным анализом проб воды, однако часть загрязнителей могут быть определены путем анализа оптических каналов электромагнитного спектра, то есть являются оптически активными компонентами (ОАК). Подобные загрязнения могут быть идентифицированы и количественно оценены на космических или околоземных мультиспектральных снимках.

Особую проблему представляют собой водоемы, расположенные вблизи крупных городских агломераций. Антропогенная деятельность приводит к загрязнению водоемов бытовыми и промышленными отходами. Например, озеро Онтарио (Канада) одно из Великих озер, испытывает проблемы с загрязнением из-за промышленных и бытовых стоков. В последние годы предпринимаются усилия по очистке и восстановлению экосистемы [13]. Другим примером служит озеро Тайху (Китай). Это крупное пресноводное озеро, страдающее от эвтрофикации и загрязнения сточными водами. Власти Китая активно работают над улучшением качества воды и предотвращением дальнейшего загрязнения [14]. Озеро Виктория является крупнейшим озером Африки, которое сталкивается с проблемами загрязнения из-за сельскохозяйственных стоков и бытовых отходов. Международные организации и местные правительства работают над решением этих проблем [15]. Озеро Эри (США) страдает от загрязнения сточными водами и сельскохозяйственными стоками, что приводит к цветению водорослей и снижению качества воды [16]. Озеро Балатон (Венгрия) крупное, но мелководное. Испытывает проблемы с эвтрофикацией из-за сельскохозяйственных стоков и бытовых отходов. Озеро Чапала крупнейшее пресноводное озеро Мексики, страдающее от загрязнения сточными водами и сельскохозяйственными стоками [17]. К подобным водоемам, нуждающимся в мониторинге, можно отнести и озеро Сорбулак, специально созданное для сбора сточных вод Алматы, крупнейшего мегаполиса Казахстана.

Универсальным средством анализа подстилающей поверхности в дистанционном мониторинге являются спектральные индексы, которые позволяют оценить динамику изменений растительности, водоемов, пожаров и т.п. на поверхности Земли [18]. Например, Normalized Difference Chlorophyll Index (NDCI) отражает содержание хлорофилла в воде, высокие значения указывают на цветение фитопланктона, значения > 0.3 – возможна эвтрофикация (это процесс чрезмерного обогащения водоёма питательными веществами, в первую очередь азотом (N) и фосфором (P), что приводит к бурному росту водорослей и фитопланктона). Высокие значения NDCI – тревожный сигнал, который указывает на цветение водорослей, что может быть связано с эвтрофикацией (избытком питательных веществ, таких как фосфор и азот). Может привести к снижению кислорода в воде и массовой гибели рыб. Низкие значения NDCI (синие зоны) – снижение биологической активности, что может быть связано с сезонными изменениями, очищением воды, уменьшением концентрации фитопланктона [19]. MNDWI используется для выявления воды, положительные значения означают наличие воды, отрицательные значения – суша, растительность. В экологической оценке водоемов используются несколько спектральных индексов для мониторинга состояния и качества воды [20...22] (Таблица 1):

Таблица 1
Спектральные индексы для мониторинга водоемов

Индекс	Аббревиатура	Формула	Назначение
Normalized Difference Water Index	NDWI	$NDWI = (G - NIR) / (G + NIR)$	Определение водоемов и мониторинг изменений уровня воды.
Modified Normalized Difference Water Index	MNDWI	$MNDWI = (G - SWIR) / (G + SWIR)$	Улучшенная идентификация водоемов, особенно в урбанизированных районах.
Normalized Difference Moisture Index	NDMI	$NDMI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$	Оценка влажности почвы и растительности, а также мониторинг водного стресса.
Water Ratio Index	WRI	$WRI = (G + RED) / (NIR + SWIR)$	Определение водоемов и оценка их состояния.
Normalized Difference Chlorophyll Index	NDCI	$NDCI = (RedEdge - RED) / (RedEdge + RED)$	Определение содержания хлорофилла в воде
Normalized Difference Turbidity Index	NDTI	$NDTI = (RED - G) / (RED + G)$	Оценка мутности воды

Примечания:

G – зеленый (Green) канал (длина волны около 0.560 мкм), NIR – ближний инфракрасный канал, SWIR - канал коротковолнового инфракрасного диапазона (Band 11 для спутника Sentinel-2), RED – красный (red) канал, RedEdge - канал красного края.

В некоторых случаях, при отсутствии канала SWIR возможна замена формулы расчета Water Ratio Index следующим образом $WRI = (G + RED) / (NIR + NIR)$ [23]

БПЛА с установленной мультиспектральной камерой потенциально позволяют получить необходимые данные для расчета спектральных индексов при мониторинге водоемов. Особый интерес представляют NDTI и NDCI, которые дают возможность оценить мутность воды и концентрацию хлорофилла в водоемах как одного из видов оптически активных компонентов, который является индикатором уровня фитопланктона и продуктивности водных экосистем. Сравнение индексов, полученных на основе спутниковых продуктов и на основе низковысотных снимков с БПЛА позволяет оценить границы применимости обоих методов.

В настоящей работе описывается процесс сопоставительного анализа загрязненности озера Сорбулак оптически активными компонентами и оцениваются границы применимости методов, основанных на спутниковом дистанционном зондировании и зондировании с применением БПЛА.

Область исследований

Рост городской агломерации Алматы, которая занимает первое место по объему регионального валового продукта с долей 22.9% в ВВП страны, и рост самого мегаполиса, население которого на конец 2024 года составляло более 2.28 миллиона человек, приво-

дит к обострению экологических проблем [24]. К их числу кроме загрязненности воздушного бассейна относятся и проблемы утилизации отходов, в частности сточных вод. Для решения задачи обработки сточных вод используется озеро Сорбулак, расположенное в Алматинской области Казахстана. Озеро является искусственным водоемом, созданным в 1970-х годах для сбора сточных вод из Алматы (рисунок 2). Первоначально оно предназначалось для предотвращения загрязнения рек и подземных вод, однако со временем озеро стало источником экологических проблем. Среди экологических проблем, связанных с озером, во-первых, выделяют собственно загрязненность воды органическими и неорганическими соединениями, в частности, считается, что озеро Сорбулак содержит высокие концентрации тяжелых металлов и других загрязняющих веществ, что представляет угрозу для окружающей среды и здоровья населения [25...26]. Во-вторых, отмечается, что уровень воды в озере подчас достигает предельных значений и, соответственно, существует опасность прорыва дамбы, что может привести к затоплению прилегающих территорий и загрязнению рек.

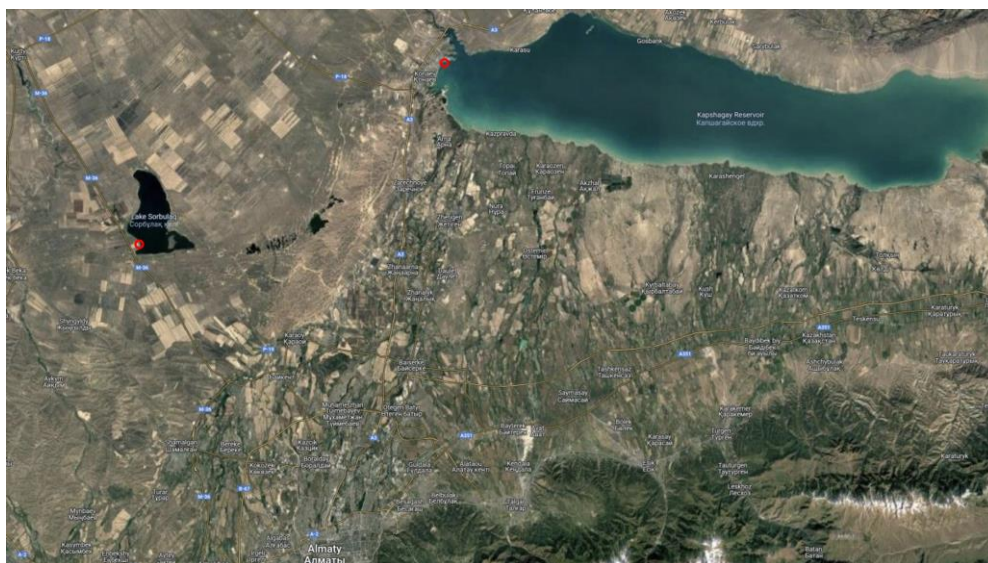


Рисунок 2. Озеро Сорбулак (слева сверху), водохранилище Капчагай (справа сверху) и город Алматы (внизу). Места проведения облетов помечены красными кружками

Для защиты подобных водоемов важно идентифицировать источники загрязнения, выполнять контроль за сбросом сточных вод и состоянием водоема. Это позволит оценить затраты на использование современных очистных сооружений, использование технологий аэрации, фильтрации и биологического разложения органических веществ. Для контроля состояния водоемов кроме наземных способов определения качества воды используются методы дистанционного зондирования, особенно в случае, когда загрязнение воды происходит оптически активными компонентами. Данный процесс с применением двух способов дистанционного мониторинга (спутниковый и БПЛА мониторинг) описан в настоящей работе. Для сравнительного анализа методов выявления ОАК и оценки загрязненности сточного водоема и проточного водохранилища выполнен мониторинг не только озера Сорбулак, но и водохранилища Капчагай. На рисунке 2 места проведения полевых экспедиций обозначены красными кружками.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Процесс исследований включал следующие этапы (рисунок 3):

- 1) Получение спутниковых продуктов и выполнение облетов БПЛА.
- 2) Формирование карт водоемов из множества снимков полученных с борта БПЛА.
- 3) Расчет спектральных индексов.
- 4) Сегментация карт спектральных индексов.

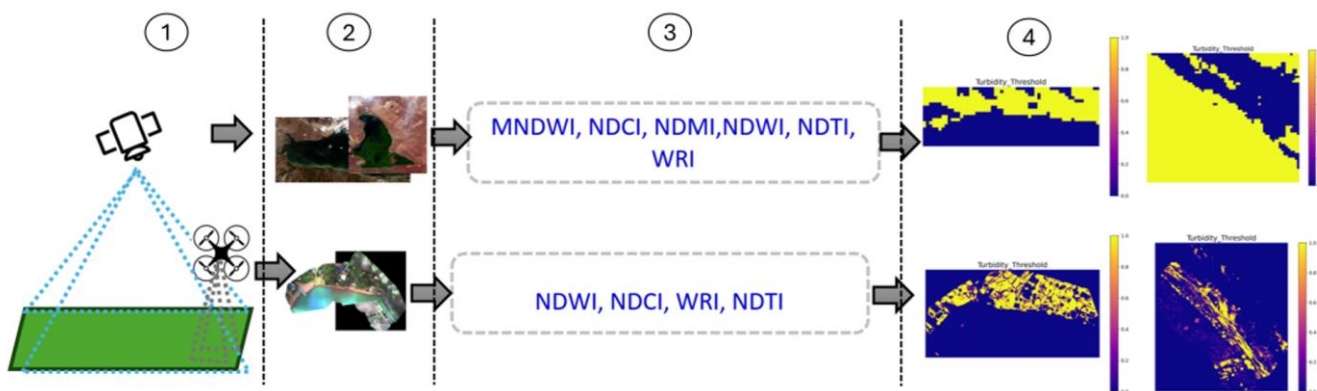


Рисунок 3. Основные этапы процесса исследований

Во-первых, получены спутниковые продукты высокого разрешения для озера Сорбулак и водохранилища Капчагай, за период максимально близкий к датам полевых работ, проведенных в июне 2024 года. Изображения водоемов со спутника в RGB показаны на рисунке 4.



Рисунок 4. Изображения водоемов со спутника. Сорбулак (слева) и Капчагай (справа)

Использованы космические снимки, полученные спутником Sentinel-2. Спутниковый продукт содержит 12 спектральных каналов от B1 до B12 и 4 канала спектральных индексов: NDVI, NDTI, NDCI, MNDWI.

Общепринятыми приложениями спектральных каналов B1...B12 являются следующие:

B1, B9, B10 – используются для атмосферных коррекций.

B4, B3, B2 – видимый спектр (RGB).

B5, B6, B7 – красный край.

B8, B8A – ближний инфракрасный диапазон (NIR), используется для NDVI.

B11, B12 – коротковолновой инфракрасный диапазон (SWIR), применяется в водных индексах (например, MNDWI).

Во-вторых, в течение четырех полевых экспедиций, к упомянутым водоемам выполнены облеты в прибрежной зоне и получены мультиспектральные снимки (рисунок 5...6).



Рисунок 5. Вид процесса облета на пульте дистанционного управления БПЛА



Рисунок 6. Процесс посадки БПЛА

БПЛА и комплекс наземных средств применённые в процессе сбора данных (рисунок 7) являются разработкой учебно-производственной лаборатории «Беспилотные летательные аппараты», созданной на базе КазНИТУ им. К.И. Сатпаева. На борту БПЛА установлена мультиспектральная камера MicaSense Altum. Полученные снимки собраны в формате geo tiff в 1017 мультиспектральных файлов, каждый из которых содержит 6 каналов (Blue, Green, Red, Nir, Red edge, LWIR). Разрешение каждого спектрального канала кроме LWIR стандартное - 2064x1544. Разрешение LWIR составляет 160x120. Пример одного из снимков приведен на рисунке 8.



Рисунок 7. БПЛА и наземное оборудование на берегу озера Сорбулак

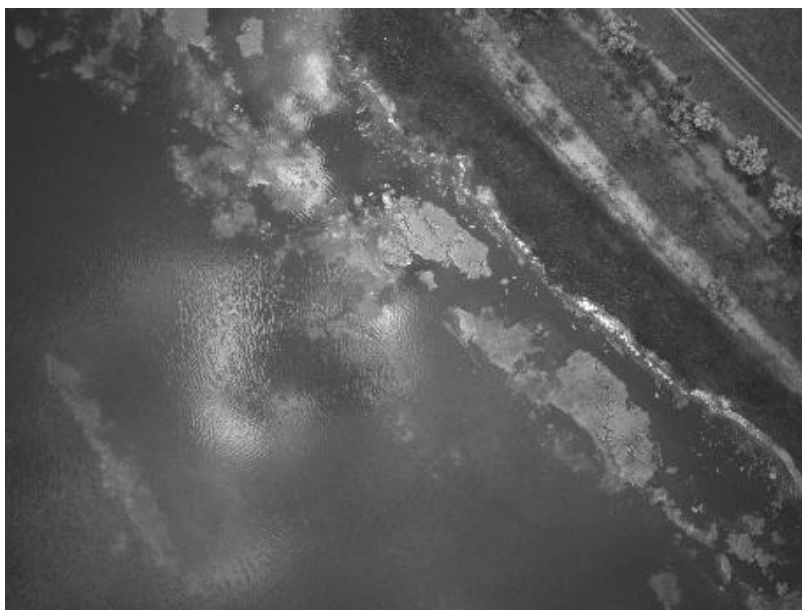


Рисунок 8. Один из каналов мультиспектрального снимка озера Сорбулак с борта БПЛА

Их полученных низковысотных снимков сформированы карты высокого разрешения (рисунок 9), где представлены сгенерированные из карты зоны облетов на озере Сорбулак и водохранилище Капчагай.

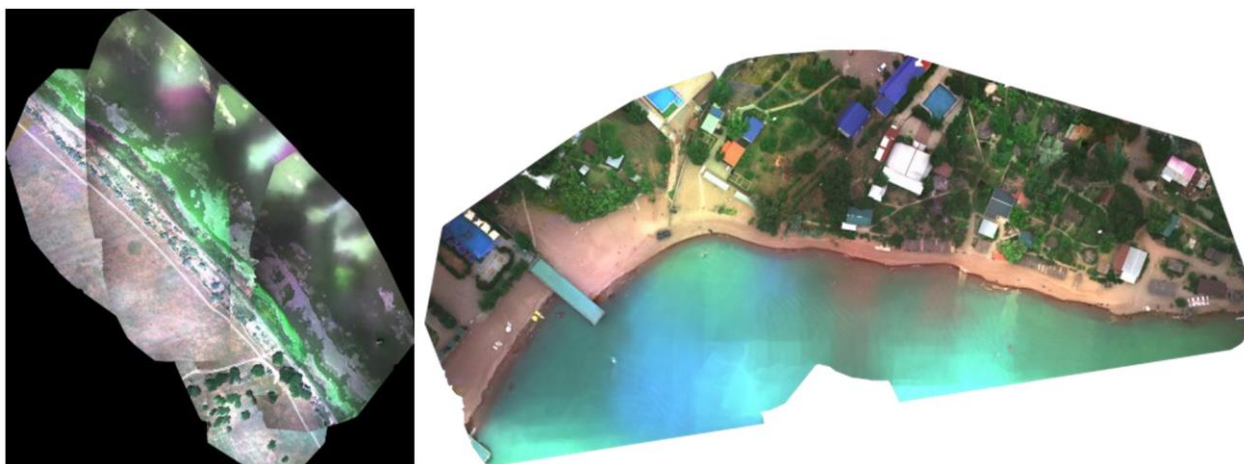


Рисунок 9. Карты высокого разрешения зон облетов на озере Сорбулак (слева) и водохранилище Капчагай (справа)

Полученные спутниковые и низковисотные данные позволяют рассчитать спектральные индексы, и сегментировать изображения несколькими методами для более ясного выявления зон загрязнения. Сегментация карт спектральных индексов выполнена с помощью трех методов, включая и алгоритм машинного обучения (K-means): Threshold Segmentation (Пороговая сегментация), Gaussian Segmentation (Гауссовская сегментация), K-means Clustering (Кластеризация K-средних). В таблице 2 приведен перечень показателей, которые используются для оценки качества воды в процессе обработки полученных спутниковых и низковисотных изображений.

Таблица 2

Расчетные показатели по спутниковым данным и данным полученным с борта БПЛА

Индекс №	Аббревиатура Показатель	Формула Диапазон значений	Назначение Что означает	Цветовая палитра (cmr)	Тип визуализации
1	NDCI	-0.3877 ... +0.5098	Содержит хлорофилл: низкие → чистая вода/растительность; высокие → цветение/эвтрофикация	viridis	Градиент
3	NDCI_Threshold	0 или 1	1 = NDCI > 0.2 (потенциальное цветение водорослей)	Greens	Дискретные классы
4	NDCI_KMeans	0, 1, 2	Кластеры NDCI: 0 = низкий, 1 = средний, 2 = высокий	viridis	Дискретные классы
5	MNDWI	-0.6611 ... +0.9036	Индекс воды: <0 = суша/растительность; >0.2 = явная вода	Blues	Градиент
7	MNDWI_Threshold	0 или 1	1 = MNDWI > 0.2 (вода)	Blues	Дискретные классы
8	MNDWI_KMeans	0, 1, 2	Кластеры MNDWI: 0 = суша, 1 = переход (берег), 2 = вода	Blues	Дискретные классы
9	NDTI (Turbidity)	-0.5863 ... +0.7022	Индекс мутности: отриц = прозрачная вода; полож = мутная вода	plasma	Градиент
11	NDTI_Threshold	0 или 1	1 = Turbidity > 0.2 (участки повышенной мутности)	plasma	Дискретные классы
12	NDTI_KMeans	0, 1, 2	Кластеры мутности: 0 = прозрачная, 1 = средняя, 2 = высокая	plasma	Дискретные классы

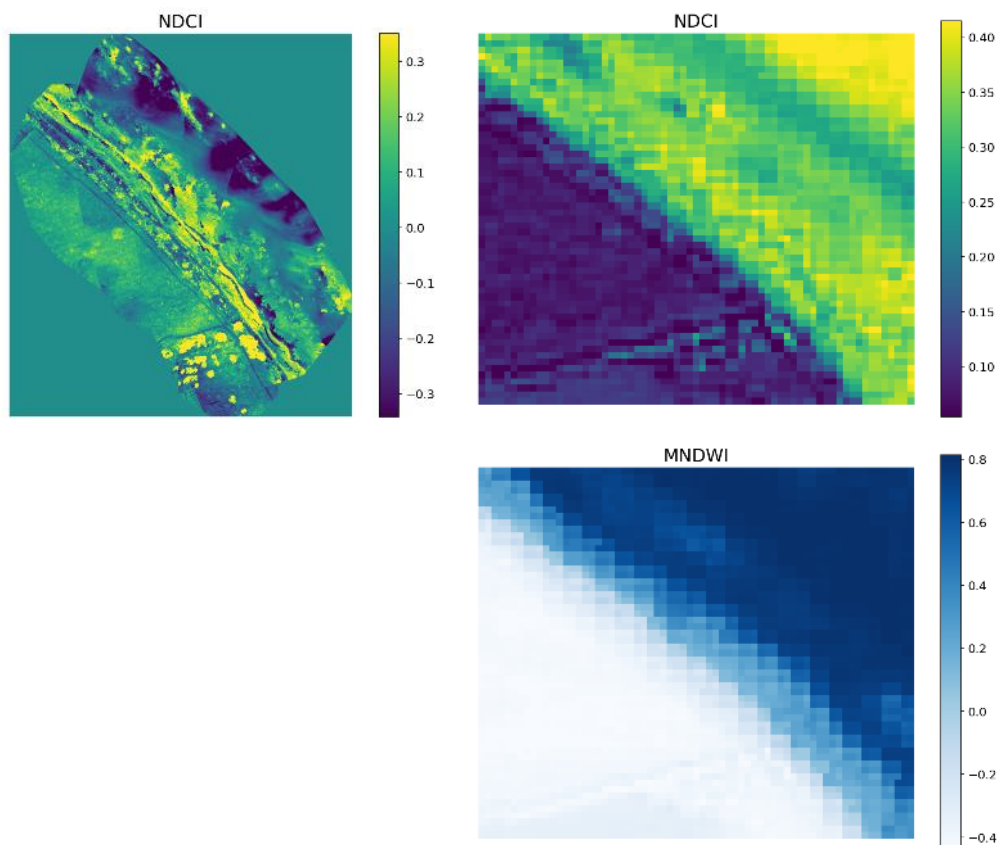
3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для сопоставления масштаба и разрешения снимков БПЛА и спутниковых снимков выполнено наложение карты снимков БПЛА на спутниковое изображение (рисунок 10).



Рисунок 10. Наложение карты снимков, полученных с помощью БПЛА на спутниковое изображение для озера Сорбулак (слева) и водохранилища Капчагай (справа)

На рисунке 11 показаны результаты расчета спектральных индексов с использованием спутникового продукта (справа) и снимков полученных с помощью БПЛА (слева) для озера Сорбулак. Пустые места в первой колонке демонстрируют что не часть спектральны индексов не может быть рассчитана с применением снимков с борта БПЛА. Можно видеть что спутниковые продукты хотя и дают более широкий перечень спектральных индексов однако обладают намного меньшим разрешением.



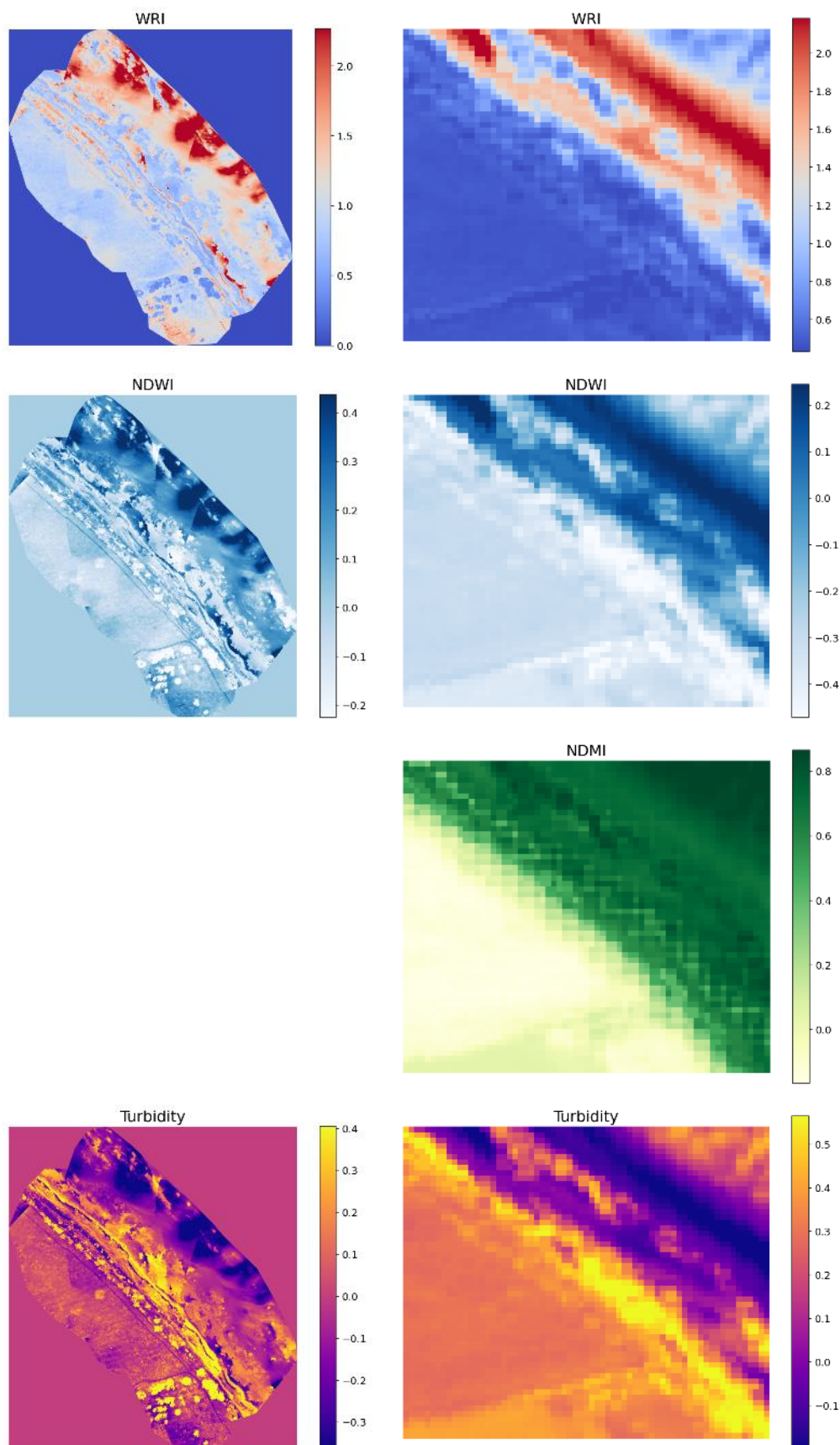
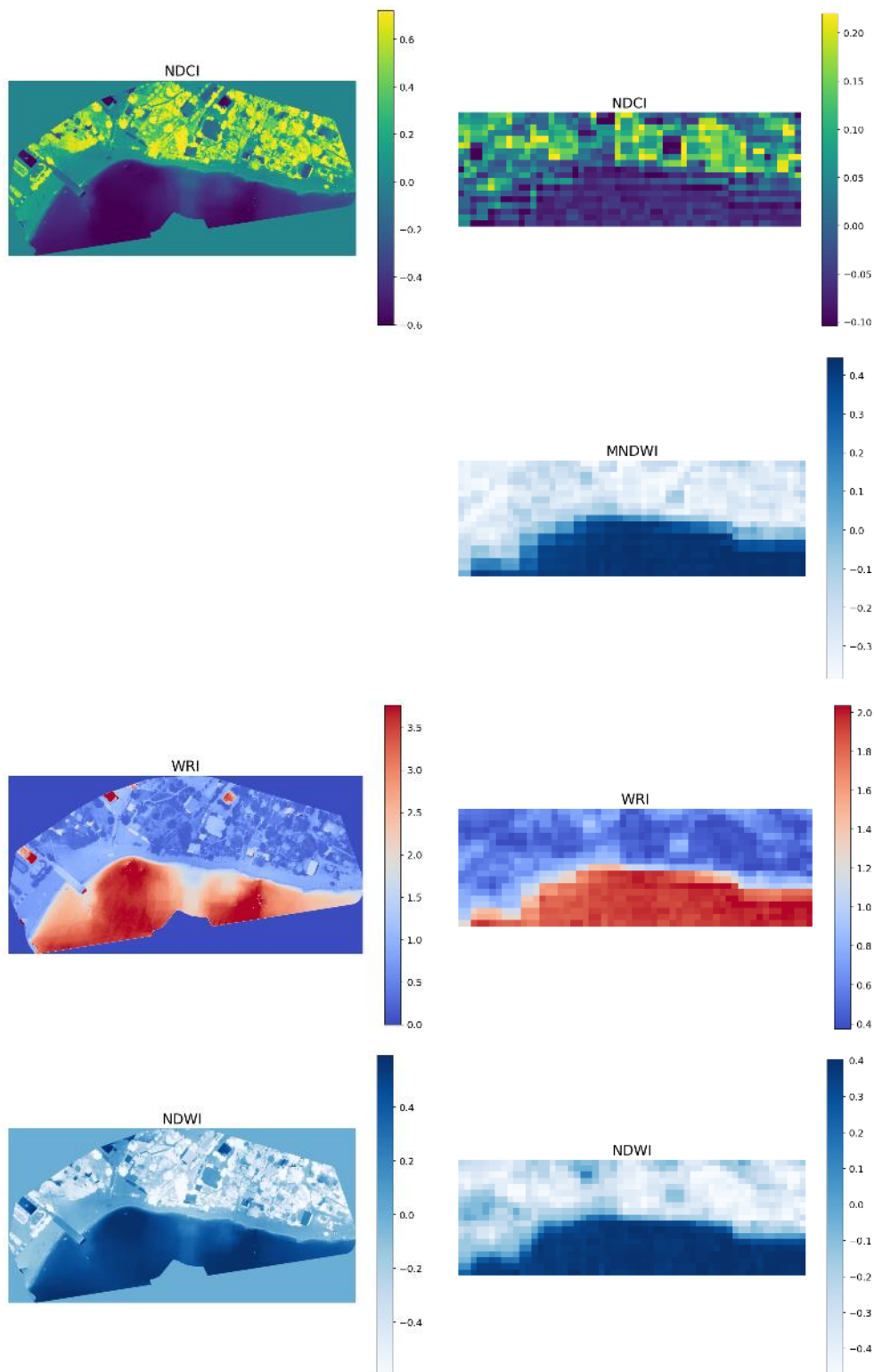


Рисунок 11. Сравнение карт спектральных индексов, полученных с БПЛА (слева) и спутника (справа)

На рисунке 12 показаны результаты расчета спектральных индексов с использованием спутникового продукта (справа) и снимков полученных с помощью БПЛА (слева) для водохранилища Капчагай.



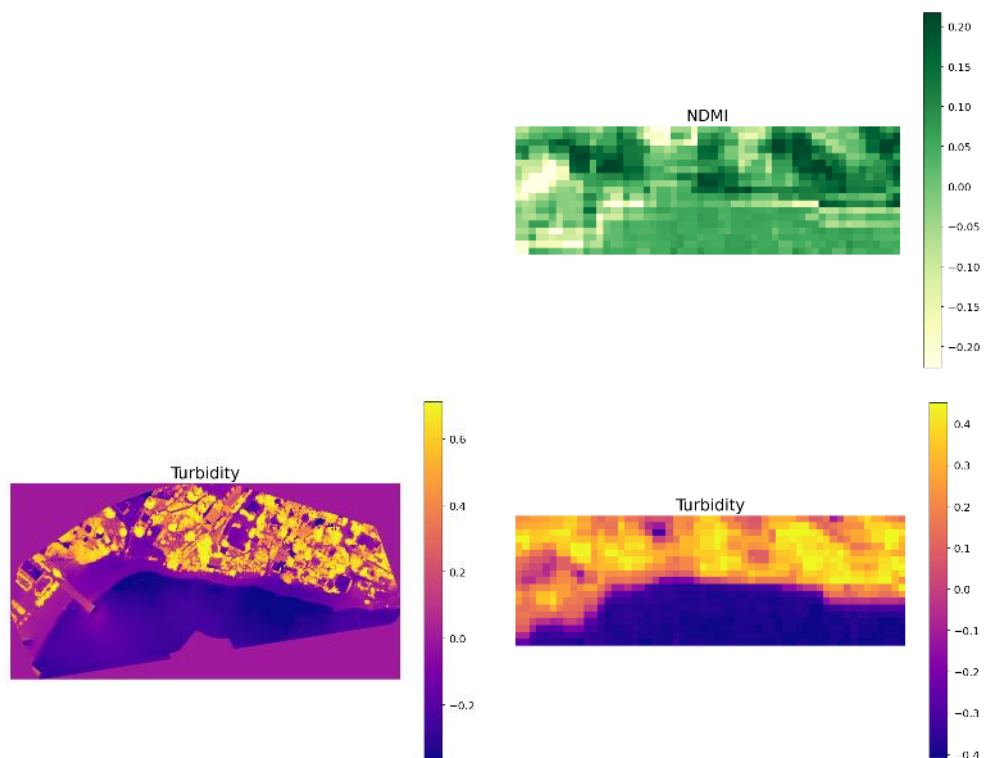


Рисунок 12. Сравнение карт спектральных индексов, полученных с БПЛА (слева) и спутника (справа)

Сегментированные изображения водоемов приведены на рисунках 13...18. Сегментация позволяет более ясно выделить зоны загрязненности особенно характерные для озера Сорбулак.

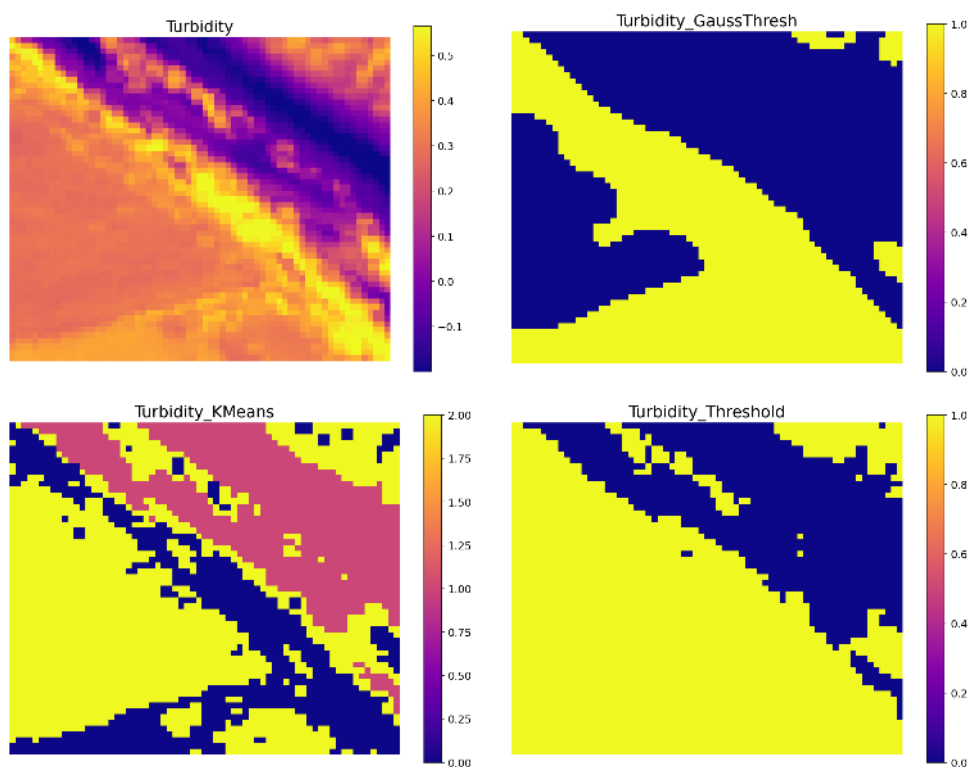


Рисунок 13. Сегментация карты NDMI прибрежной зоны озера Сорбулак видимой со спутника

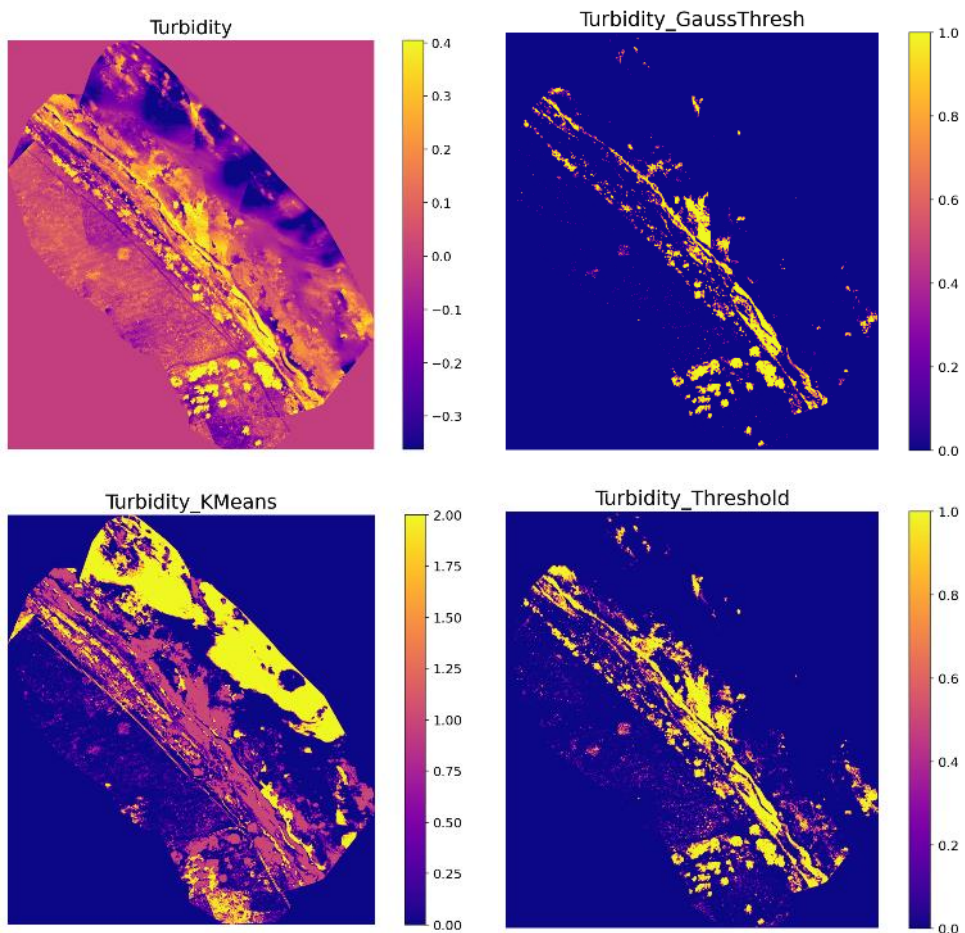
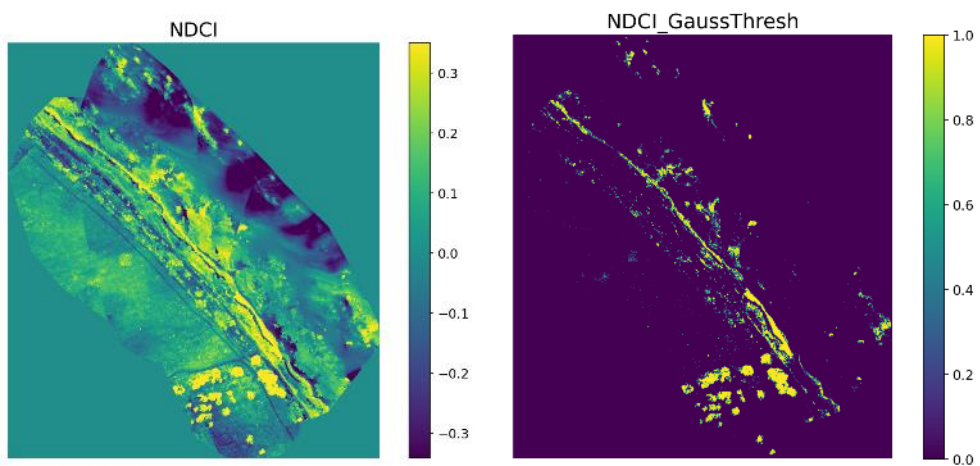


Рисунок 14. Сегментация карты NDTI прибрежной зоны озера Сорбулак по снимкам с БПЛА



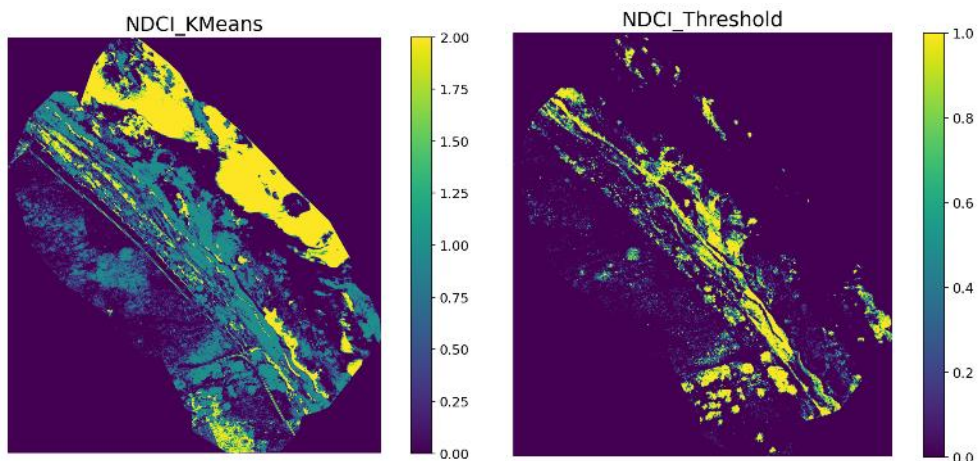


Рисунок 15. Сегментация карты NDCI прибрежной зоны озера Сорбулак по снимкам с БПЛА

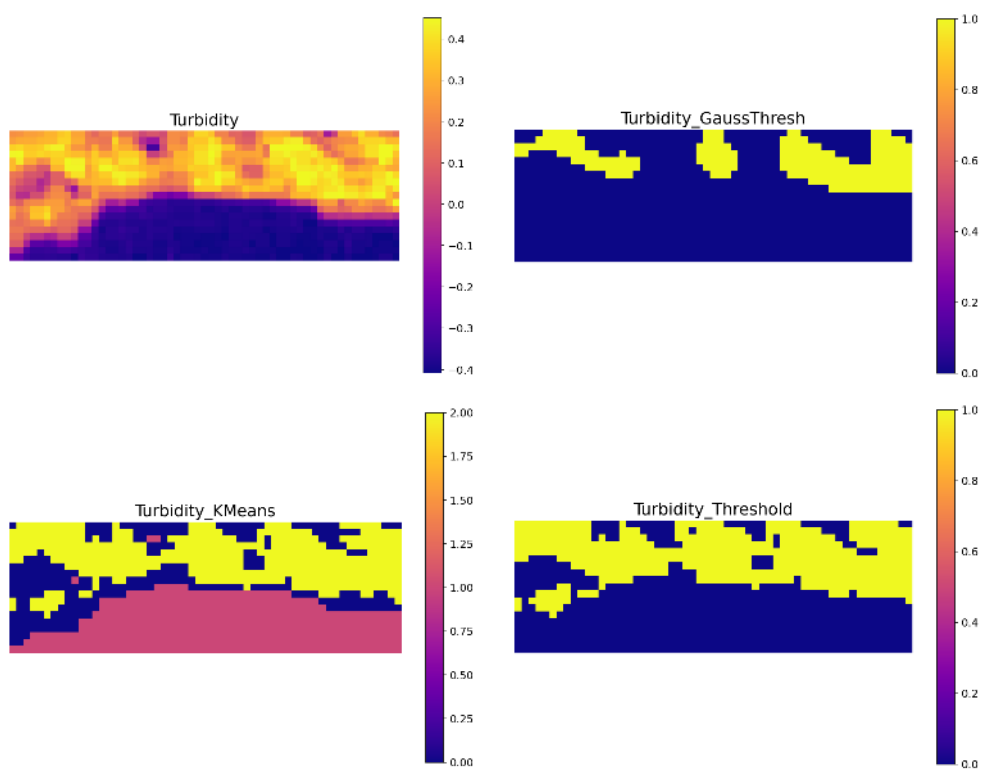
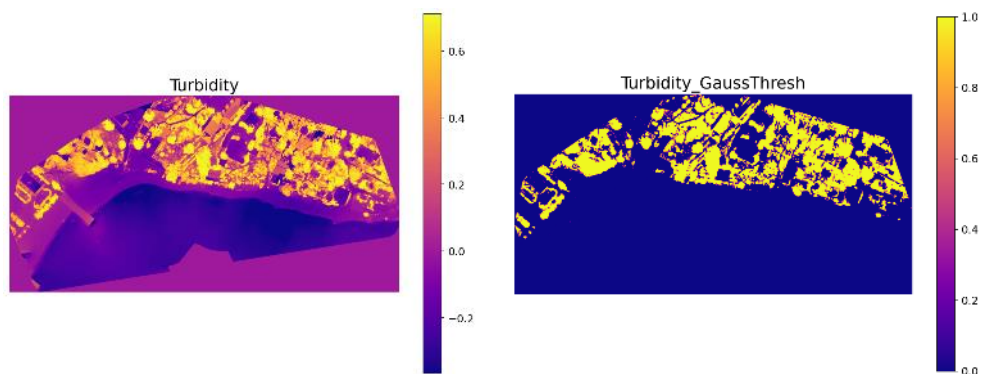


Рисунок 16. Сегментация карты NDTI прибрежной зоны на водохранилище Капчагай видимой со спутника



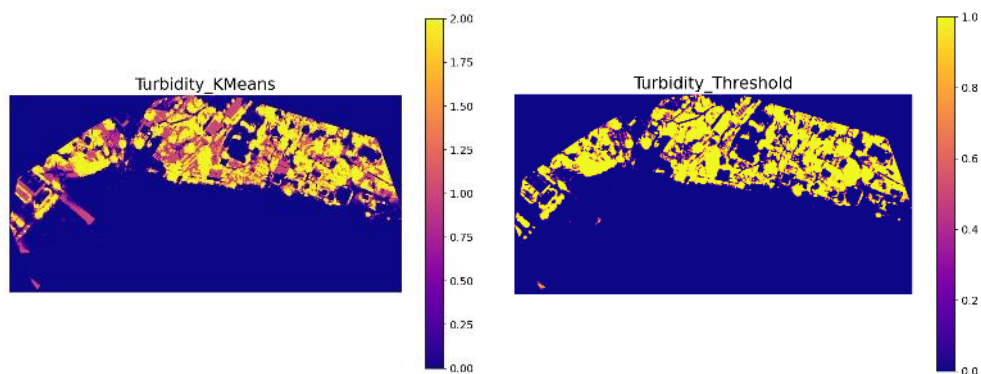


Рисунок 17. Сегментация карты NDTI прибрежной зоны на водохранилище Капчагай по снимкам с БПЛА

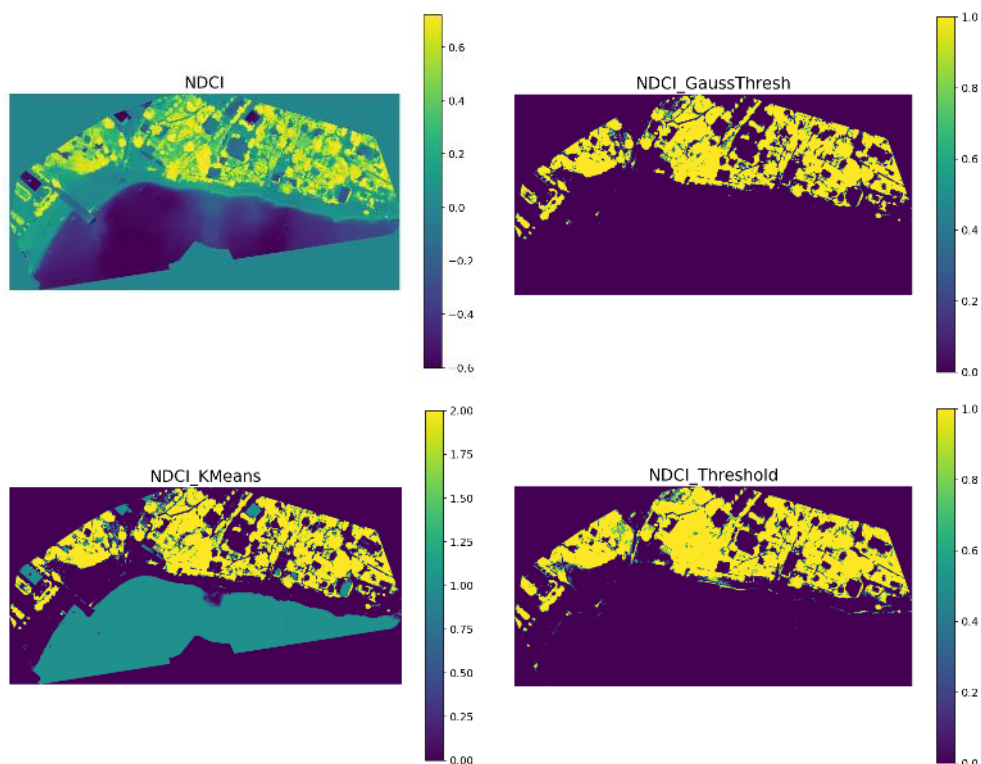


Рисунок 18. Сегментация карты NDCI прибрежной зоны на водохранилище Капчагай по снимкам с БПЛА

Сравнивая карты WRI и NDTI можно сделать предположение, что повышенные значения мутности характерны для мелких участков прибрежной зоны. То есть БПЛА «видит» дно водоема. То же самое характерно и при сравнении WRI и NDCI. Применение «линейных» методов сегментации таких как пороговая или гауссова сегментация позволяет более точно выделить зоны повышенной мутности или зоны повышенного содержания хлорофилла. Однако применение этих методов требует настройки пороговых значений. Применение k-means скорее полезно для выявления потенциальных зон мутности.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Формальное сравнение двух водоемов по значениями индексов показывает, что Капчагай значительно чище. Максимальное значение индекса мутности (NDTI) для Капчагая достигает значения 0.1, а индекса содержания хлорофилла (NDCI) -0.2.

Аналогичные значения для Сорбулака 0.4 и 0.35. Эти результаты вполне предсказуемы учитывая назначение водоемов, однако спектральные индексы позволили сделать численную оценку загрязненности.

Сравнивая карты на тестовых участках видно, что БПЛА дает, во-первых, более детальную картину содержания хлорофилла в воде и показывает его повышенное содержание в прибрежной зоне, в то время как спутниковое изображение менее дифференцировано. Во-вторых, БПЛА позволяет получить детализованное изображение мутности, что полезно для выявления причин и следствий загрязнения воды. Вместе с тем мультиспектральные камеры, устанавливаемые на БПЛА не имеют камеры коротковолнового инфракрасного диапазона (SWIR), что не позволяет выполнять точные расчеты некоторых спектральных индексов (MNDWI, NDMI, WRI). Подводя итог можно констатировать, что рассматриваемые методы дистанционного зондирования могут дополнять друг друга для получения более полного набора спектральных индексов, либо карт высокого разрешения в особо интересных зонах. Появляются возможности определения координат источников загрязнения, возникает основа для понимания и типирования гидрологических режимов перемешивания водных слоев озера Сорбулак. Циркуляционные режимы перемешивания воды в озере, очевидно, тесно связаны с погодными условиями, особенно с ветровым полем, но именно они определяют пространственное распределение загрязнений. Это направление в исследованиях может стать целью будущих работ.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Иллюстрации в высоком разрешении можно скачать по ссылке <https://www.dropbox.com/scl/fo/zkm5lriyg2fldcaph7mf9/AN6uWKjgh95zUJ-DeJPfjcc?rlkey=kbiefb081exylt10cwsqkyxh&dl=0>

ВКЛАД АВТОРОВ

Концептуализация – Р.И.М.; Управление данными – В.В.С.; Формальный анализ – Р.И.М.; Методология – А.Г.Т.; Программное обеспечение – В.В.С., К.Д.Г.; Отслеживание – В.В.С., А.С.; Визуализация – А.С., К.Д.Г.; Написание исходного проекта – РИМ, Е.Л.М. Ф.Н.А.; Написание и редактирование – Е.Л.М., Ф.Н.А.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант BR28713375 «Многоцелевая роботизированная беспилотная летательная платформа дистанционного мониторинга (AeroScope)»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Albrecht V., Mukhamediev R.I., Popova Y., Muhamedijeva E., Botaibekov A. Top2Vec Topic Modeling to Analyze the Dynamics of Publication Activity Related to Environmental Monitoring Using Unmanned Aerial Vehicles // Publications. – 2025. – Vol. 13(2). – P. 15. – DOI: <https://doi.org/10.3390/publications13020015>.
2. Li B., et al. Three-dimensional diffusion patterns of traffic-related air pollutants on the roadside based on unmanned aerial vehicles monitoring // Building and Environment. – 2022. – Vol. 219. – P. 109159. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132322003961>
3. Hemamalini R.R., et al. Air quality monitoring and forecasting using smart drones and recurrent neural network for sustainable development in Chennai city // Sustainable Cities and Society. – 2022. – Vol. 85. – P. 104077. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221067072200395X>
4. Arroyo P., et al. Electrochemical gas sensing module combined with unmanned aerial vehicles for air quality monitoring // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2022. – Vol. 364. – P. 131815. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400522004579>
5. Cozma A., et al. Autonomous Multi-Rotor Aerial Platform for Air Pollution Monitoring // Sensors. – 2022. – Vol. 22, № 3. – P. 860. – URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/3/860>.
6. De Fazio R., et al. A sensor-based drone for pollutants detection in eco-friendly cities: Hardware design and data analysis application // Electronics. – 2021. – Vol. 11, № 1. – P. 52.
7. Jiang Y., et al. Identification of the atmospheric boundary layer structure through vertical distribution of PM_{2.5} obtained by unmanned aerial vehicle measurements // Atmospheric Environment. – 2022. – Vol. 278. – P. 119084. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1352231022001492>.
8. Liu X., et al. Quantification of multifactorial effects on particle distributions at urban neighborhood scale using machine learning and unmanned aerial vehicle measurement // Journal of Cleaner Production. – 2022. – Vol. 378. – P. 134494.
9. Li C., et al. Investigating the vertical distribution patterns of urban air pollution based on unmanned aerial vehicle gradient monitoring // Sustainable Cities and Society. – 2022. – Vol. 86. – P. 104144.
10. Sharma R., Arya R. UAV based long range environment monitoring system with Industry 5.0 perspectives for smart city infrastructure // Computers & Industrial Engineering. – 2022. – Vol. 168. – P. 108066.

11. Minea M., Dumitrescu C.M. Urban Traffic Noise Analysis Using UAV-Based Array of Microphones // *Sensors*. – 2023. – Vol. 23, № 4. – P. 1912. – URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/4/1912>.
12. Medvedev A., Telnova N., Alekseenko N., Koshkarev A., Kuznetchenko P., Asmaryan S., Narykov A. UAV-derived data application for environmental monitoring of the coastal area of Lake Sevan, Armenia with a changing water level // *Remote Sensing*. – 2020. – Vol. 12, № 22. – P. 3821. – URL: <https://doi.org/10.3390/rs12223821>.
13. Tenkouano G.T., Cumming B.F., Jamieson H.E. Geochemical and ecological changes within Moira Lake (Ontario, Canada): A legacy of industrial contamination and remediation // *Environmental Pollution*. – 2019. – Vol. 247. – P. 980–988. – DOI: [10.1016/j.envpol.2019.01.019](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.01.019)
14. Chen J., Liu X., Chen J., Jin H., Wang T., Zhu W., Li L. Underestimated nutrient from aquaculture ponds to lake eutrophication: A case study on Taihu Lake Basin // *Journal of Hydrology*. – 2024. – Vol. 630. – P. 130749.
15. Muli J.R. Environmental problems of Lake Victoria (East Africa): what the international community can do // *Lakes & Reservoirs: Research & Management*. – 1996. – Vol. 2(1–2). – P. 47–53.
16. Watson S.B., Miller C., Arhonditsis G., Boyer G.L., Carmichael W., Charlton M.N., et al. The re-eutrophication of Lake Erie: Harmful algal blooms and hypoxia // *Harmful Algae*. – 2016. – Vol. 56. – P. 44–66.
17. Ramírez-Sánchez H.U., Fajardo-Montiel A.L. Assessment of water quality, ecological and health risks of inland water bodies in Mexico: A case study of Lake Chapala // *Asian Journal of Environment & Ecology*. – 2024. – Vol. 23(6). – P. 91–108.
18. Montero D., et al. A standardized catalogue of spectral indices to advance the use of remote sensing in Earth system research // *Scientific Data*. – 2023. – Vol. 10, № 1. – P. 197.
19. Mishra S., Mishra D.R. Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters // *Remote Sensing of Environment*. – 2012. – Vol. 117. – P. 394–406.
20. Prasad A.D., et al. Remote sensing satellite data and spectral indices: an initial evaluation for the sustainable development of an urban area // *Sustainable Water Resources Management*. – 2022. – Vol. 8, № 1. – P. 19.
21. Yang Z., Reiter M., Munyei N. Estimation of chlorophyll-a concentrations in diverse water bodies using ratio-based NIR/Red indices // *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. – 2017. – Vol. 6. – P. 52–58.
22. Nagaraj R., Kumar L.S. Extraction of surface water bodies using optical remote sensing images: A review // *Earth Science Informatics*. – 2024. – Vol. 17, № 2. – P. 893–956.
23. Laonamsai J., Julphunthong P., Saprathet T., Kimmany B., Ganchanasuragit T., Chomcheawchan P., Tomun N. Utilizing NDWI, MNDWI, SAVI, WRI, and AWEI for Estimating Erosion and Deposition in Ping River in Thailand // *Hydrology*. – 2023. – Vol. 10. – P. 70. – DOI: <https://doi.org/10.3390/hydrology10030070>.
24. Бюро национальной статистики Республики Казахстан. (2024). Валовой региональный продукт Республики Казахстан за 2024 год: статистический бюллетень. <https://stat.gov.kz/ru/news/valovoy-regionalnyy-produkt-respubliki-kazakhstan-za-2024/> (дата обращения: 22.08.2025).
25. Есырєв О.В., Купчишин А.И., Костюк Т.П., Мухамеджанов Э.К., Ходарина Н.Н. Наличие тяжелых металлов в представителях флоры и фауны озера-накопителя Сорбулак // *Актуальные проблемы экологии и здоровья человека: материалы конф.* – 2015. – С. 74–77.
26. Озеро Сорбулак алматинская область // *Байкал24 – Наука*. – URL: <https://baikal24-nauka.ru/ozero-sorbulak-almatinskaya-oblast/> (дата обращения: 08.08.2025).

REFERENCES

1. Albrekht, V., Mukhamediev, R. I., Popova, Y., Muhamedijeva, E., & Botaibekov, A. (2025). Top2Vec topic modeling to analyze the dynamics of publication activity related to environmental monitoring using unmanned aerial vehicles. *Publications*, 13, 15. <https://doi.org/10.3390/publications13020015>
2. Li, B., et al. (2022). Three-dimensional diffusion patterns of traffic-related air pollutants on the roadside based on unmanned aerial vehicles monitoring. *Building and Environment*, 219, 109159. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132322003961>
3. Hemamalini, R. R., et al. (2022). Air quality monitoring and forecasting using smart drones and recurrent neural network for sustainable development in Chennai city. *Sustainable Cities and Society*, 85, 104077. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221067072200395X>
4. Arroyo, P., et al. (2022). Electrochemical gas sensing module combined with unmanned aerial vehicles for air quality monitoring. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 364, 131815. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400522004579>
5. Cozma, A., et al. (2022). Autonomous multi-rotor aerial platform for air pollution monitoring. *Sensors*, 22(3), 860. <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/3/860>
6. De Fazio, R., et al. (2021). A sensor-based drone for pollutants detection in eco-friendly cities: Hardware design and data analysis application. *Electronics*, 11(1), 52.
7. Jiang, Y., et al. (2022). Identification of the atmospheric boundary layer structure through vertical distribution of PM2.5 obtained by unmanned aerial vehicle measurements. *Atmospheric Environment*, 278, 119084. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1352231022001492>
8. Liu, X., et al. (2022). Quantification of multifactorial effects on particle distributions at urban neighborhood scale using machine learning and unmanned aerial vehicle measurement. *Journal of Cleaner Production*, 378, 134494.
9. Li, C., et al. (2022). Investigating the vertical distribution patterns of urban air pollution based on unmanned aerial vehicle gradient monitoring. *Sustainable Cities and Society*, 86, 104144.
10. Sharma, R., & Arya, R. (2022). UAV based long range environment monitoring system with Industry 5.0 perspectives for smart city infrastructure. *Computers & Industrial Engineering*, 168, 108066.
11. Minea, M., & Dumitrescu, C. M. (2023). Urban traffic noise analysis using UAV-based array of microphones. *Sensors*, 23(4), 1912. <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/4/1912>
12. Medvedev, A., Telnova, N., Alekseenko, N., Koshkarev, A., Kuznetchenko, P., Asmaryan, S., & Narykov, A. (2020). UAV-derived data application for environmental monitoring of the coastal area of Lake Sevan, Armenia with a changing water level. *Remote Sensing*, 12(22), 3821.

13. Tenkouano, G. T., Cumming, B. F., & Jamieson, H. E. (2019). Geochemical and ecological changes within Moira Lake (Ontario, Canada): A legacy of industrial contamination and remediation. *Environmental Pollution*, 247, 980–988.
14. Chen, J., Liu, X., Chen, J., Jin, H., Wang, T., Zhu, W., & Li, L. (2024). Underestimated nutrient from aquaculture ponds to lake eutrophication: A case study on Taihu Lake Basin. *Journal of Hydrology*, 630, 130749.
15. Muli, J. R. (1996). Environmental problems of Lake Victoria (East Africa): What the international community can do. *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, 2(1–2), 47–53.
16. Watson, S. B., Miller, C., Arhonditsis, G., Boyer, G. L., Carmichael, W., Charlton, M. N., ... & Wilhelm, S. W. (2016). The re-eutrophication of Lake Erie: Harmful algal blooms and hypoxia. *Harmful Algae*, 56, 44–66.
17. Ramírez-Sánchez, H. U., & Fajardo-Montiel, A. L. (2024). Assessment of water quality, ecological and health risks of inland water bodies in Mexico: A case study of Lake Chapala. *Asian Journal of Environment & Ecology*, 23(6), 91–108.
18. Montero, D., et al. (2023). A standardized catalogue of spectral indices to advance the use of remote sensing in Earth system research. *Scientific Data*, 10(1), 197.
19. Mishra, S., & Mishra, D. R. (2012). Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters. *Remote Sensing of Environment*, 117, 394–406.
20. Prasad, A. D., et al. (2022). Remote sensing satellite data and spectral indices: An initial evaluation for the sustainable development of an urban area. *Sustainable Water Resources Management*, 8(1), 19.
21. Yang, Z., Reiter, M., & Munyei, N. (2017). Estimation of chlorophyll-a concentrations in diverse water bodies using ratio-based NIR/Red indices. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 6, 52–58.
22. Nagaraj, R., & Kumar, L. S. (2024). Extraction of surface water bodies using optical remote sensing images: A review. *Earth Science Informatics*, 17(2), 893–956.
23. Laonamsai, J., Julphunthong, P., Sapprathet, T., Kimmany, B., Ganchanasuragit, T., Chomcheawchan, P., & Tomun, N. (2023). Utilizing NDWI, MNDWI, SAVI, WRI, and AWEI for estimating erosion and deposition in Ping River in Thailand. *Hydrology*, 10, 70. <https://doi.org/10.3390/hydrology10030070>
24. Gross regional product of the Republic of Kazakhstan for 2024: Statistical bulletin]. *Stat.gov.kz*. Retrieved August 22, 2025, from <https://stat.gov.kz/ru/news/valovoy-regionalnyy-produkt-respubliki-kazakhstan-za-2024/> [in Russian]
25. Esyrev, O. V., Kupchishin, A. I., Kostyuk, T. P., Mukhamedzhanov, E. K., & Khodarina, N. N. (2015). Naličie tjaželyh metallov v predstavitel'jakh flory i fauny ozera-nakopitel'ja Sorbulak [The presence of heavy metals in representatives of flora and fauna of the Sorbulak reservoir]. In *Aktual'nye problemy ekologii i zdorov'ja cheloveka* (pp. 74–77) [in Russian].
26. Ozero Sorbulak Almatinskaja oblast' [Lake Sorbulak, Almaty region]. (n.d.). *Bajkal24 – Nauka*. Retrieved August 8, 2025, from <https://baikal24-nauka.ru/ozero-sorbulak-almatinskaya-oblast> [in Russian].

АЛМАТЫ ОБЛЫСЫ СУ ҚОЙМАЛАРЫНДАҒЫ ОПТИКАЛЫҚ БЕЛСЕНДІ КОМПОНЕНТТЕРДІ ҚАШЫҚТЫҚТАН БАҚЫЛАУ ӘДІСТЕРІНІҢ САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУЫ

Равиль И. Мухамедиев^{1,2}, инж. ғ. д, Валентин В. Смурьгин¹, Кирилл Д. Гизатулин¹, Адилхан Сымагулов^{1,2}, Алексей Г. Терехов^{2,3}, т. ғ. к., Елена Л. Мухамедиева^{1,2}, Фарида Н. Абдолдина¹, т. ғ. к.

¹ КЕАҚ «Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті» (Satbayev University), Алматы, Қазақстан; ravil.muhamedyev@gmail.com (Р.И.М.), valentinsmurygin@gmail.com (В.В.С.), gkd.030201@gmail.com (К.Д.Г.), asmogulove00@gmail.com (А.С.), abdoldinafarida@gmail.com (Ф.Н.А.).

² ҚР БҒМ ҒК Ақпараттық және есептеу технологиялары институты, Алматы, Қазақстан; muhamedijeva@gmail.com (Е.Л.М.)

³ «Қазгидромет» РМК, Алматы, Қазақстан; aterekhov1@yandex.ru (А.Г.Т.)

Автор корреспонденциясы: Фарида Н. Абдолдина, abdoldinafarida@gmail.com

ТҮЙІН СӨЗДЕР

Оптикалық белсенді компоненттер, Сорбулақ көлі, Су ластануы, Қашықтықтан мониторинг, Ұшқышсыз ұшу аппараты (ҰҰА)

Мақала жайында:

Алынды: 16.08.2025

Қайта қаралды: 09.03.2026

Қабылданды: 10.03.2026





Жарияланды: 01.04.2026

АБСТРАКТ

Бұл жұмыста Сорбулақ көлі мен Қапшағай су қоймасына жүргізілген далалық экспедициялар барысында жиналған деректер жиынтығы сипатталған. Аталған су айдындарының жағалау аймағында мультиспектралды камералармен жабдықталған ұшқышсыз ұшу аппараты (ҰҰА) көмегімен әуе түсірілімдері орындалды. Су бетінің және су айдындарындағы оптикалық белсенді компоненттердің болуын анықтауға арналған спектралдық индекстер есептеліп, картографияланды. Бұл мақсатта спутниктік өнімдер (MNDWI, NDCI, NDMI, NDWI, NDTI, WRI) және ҰҰА арқылы алынған бейнелер (NDWI, NDCI, WRI, NDTI) пайдаланылды. Су айдындарының оптикалық белсенді компоненттермен (судың лайлылығы және хлорофилл мөлшері) ластануын бағалау сапасы бойынша спутниктік суреттер мен ҰҰА суреттерін қолдану нәтижелері салыстырылды. Зерттеу нәтижелері Сорбулақ көлі жағалау аймағының ластану деңгейі Қапшағай су қоймасына қарағанда бірнеше есе жоғары екенін көрсетті. ҰҰА шағын ауқымда жоғары детальділікке ие, уақыттық және кеңістіктік рұқсаттылығы жоғары мониторинг жүргізуге мүмкіндік береді. Дегенмен, ҰҰА-ға орнатылатын шағын мультиспектралды камералардың спектрлік арна саны

шектеулі, сондай-ақ мониторинг ауқымы бойынша да шектеулер бар. Ал спутниктік мониторинг кең ауқымды қамтиды, тіпті спутниктік өнімдердің тегін нұсқасында да спектрлік арналар саны көп, бірақ кеңістіктік және уақыттық рұқсаттылығы айтарлықтай төмен. Осы екі технологияның артықшылықтарын үйлестіре пайдалану ірі су айдындарын қарқынды антропогендік әсер аймақтарында тиімді әрі жедел мониторинг жүргізудің сапасын арттыра алады

MONITORING COMPARATIVE ANALYSIS OF REMOTE METHODS FOR MONITORING OPTICALLY ACTIVE COMPONENTS IN WATER BODIES OF THE ALMATY REGION

Ravil I. Mukhamediev^{1,2} , Dr.Eng.Sc., Valentin V. Smurygin¹, Kirill D. Gizatulin¹, Adilkhan Symagulov^{1,2} , Alexey G. Terekhov^{2,3} , Ph.D. (Tech.), Elena L. Mukhamedieva^{1,2}, Farida N. Abdoldina¹ , Ph.D. (Tech.)

¹ Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; ravil.muhamedyev@gmail.com (R.I.M.), valentinsmurygin@gmail.com (V.V.S.), gkd.030201@gmail.com (K.D.G.), asmogulove00@gmail.com (A.S.), abdoldinafarida@gmail.com (F.N.A.)

² Institute of information and computational technologies, CS MSE RK, Almaty, Kazakhstan; muhamedijsva@gmail.com (E.L.M.)

³ RSE "Kazhydromet", Almaty, Kazakhstan; aterekhov1@yandex.ru (A.G.T.)

Corresponding author: Farida N. Abdoldina, abdoldinafarida@gmail.com

KEY WORDS

Optically active components, Sorbulak Lake, Water pollution, Remote monitoring, Unmanned Aerial Vehicle (UAV)

About article:

Received: 16.08.2025

Revised: 09.03.2026

Accepted: 10.03.2026

Published: 01.04.2026

ABSTRACT

This study presents a dataset obtained during field expeditions to Sorbulak Lake and Kapchagay Reservoir. UAV-based surveys were conducted in the coastal zones of these water bodies using a multispectral camera. Spectral indices were calculated and mapped to detect water surfaces and identify the presence of optically active components in the water bodies, based on satellite products (MNDWI, NDCI, NDMI, NDWI, NDTI, WRI) and UAV-acquired imagery (NDWI, NDCI, WRI, NDTI). A comparative assessment was carried out to evaluate water pollution by optically active components using both satellite imagery and UAV-derived images. The results show that the pollution level of Sorbulak Lake's coastal zone (turbidity and chlorophyll content) is several times higher than that of Kapchagay Reservoir. UAVs provide high-detail monitoring at small scales, with the ability to perform observations at high temporal and spatial resolutions. However, small-sized multispectral cameras installed on UAVs are limited in the number of spectral bands and in the scale of monitoring they can perform. Conversely, satellite monitoring covers larger areas and offers a greater number of spectral bands, even in free-access satellite products, but at much lower spatial and temporal resolutions. It is evident that integrating the capabilities of both technologies can enhance the quality and timeliness of monitoring large water bodies located in areas of significant anthropogenic impact.

Примечание издателя: заявления, мнения и данные во всех публикациях принадлежат только автору (авторам), а не журналу "Гидрометеорология и экология" и/или редактору (редакторам).