

А. Б. Александрова^{1,2}, И. И. Зиганшин^{3,4}, Р. Р. Хасанов⁵, С. С. Рязанов⁶, А. М. Сабирзянов⁷, Е. М. Пудовик⁸

ПРИМЕНЕНИЕ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ СНИМКОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗАРАСТАНИЯ ОЗЕР

АННОТАЦИЯ

Исследование посвящено анализу зарастания 12-ти озер ООПТ Лайшевского муниципального р-на Республики Татарстан за период 2003–2023 гг. с применением геоинформационных технологий и спектральных индексов (NDVI, NDWI, MNDWI, WRI) на основе спутниковых снимков Sentinel-2A, которые подвержены различной форме и скорости зарастания. Было установлено, что скорость зарастания варьируется от 0,03 до 0,7 га в год, а его показатель площади достигает значений до 83 %. Наибольшие изменения отмечены у озер Свежее, Столбище, Чистое и Сапуголи, что связано с антропогенной нагрузкой вокруг данных озер. Диагностика зарастания наиболее эффективна при использовании вегетационных индексов NDVI, NDWI и MNDWI, тогда как WRI показал довольно низкую точность для малых озер площадью водного зеркала меньше 1 га. Для крупных озер (площадью больше 0,7 км²) с зарастанием меньше 10 % ошибка диагностики не превышает 2 %, что доказывает надежность применения указанных индексов в исследовании зарастания озер. Для малых озер площадью менее 0,2 км² с зарастанием больше 20 % площади ошибка достигает 10–21 %, что требует дополнения данными Google Earth Pro. Для крупных озер рекомендовано применять индексы NDVI, NDWI и MNDWI; для малых же, с высокой степенью зарастания — использовать комбинацию методов, включая ручную оцифровку. Итоговые результаты показывают необходимость адаптации дистанционных методов мониторинга в зависимости от размеров и антропогенной нагрузки на водные объекты.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вегетационный индекс, зарастание, озеро, дистанционное зондирование Земли, космические снимки

¹ Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, ул. Даурская, д. 28, Казань, Россия, 420087,
e-mail: adabl@mail.ru

² Казанский (Приволжский) федеральный университет, ул. Кремлевская, д. 18, Казань, Россия, 420008,
e-mail: adabl@mail.ru

³ Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, ул. Даурская, д. 28, Казань, Россия, 420087,
e-mail: irek_ziganshin@mail.ru

⁴ Казанский (Приволжский) федеральный университет, ул. Кремлевская, д. 18, Казань, Россия, 420008,
e-mail: irek_ziganshin@mail.ru

⁵ Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, ул. Даурская, д. 28, Казань, Россия, 420087,
e-mail: rustamkhasanov88@gmail.com

⁶ Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, ул. Даурская, д. 28, Казань, Россия, 420087,
e-mail: rstanislav.soil@yandex.ru

⁷ Казанский (Приволжский) федеральный университет, ул. Кремлевская, д. 18, Казань, Россия, 420008,
e-mail: sabiralmaz@mail.ru

⁸ Казанский (Приволжский) федеральный университет, ул. Кремлевская, д. 18, Казань, Россия, 420008,
e-mail: epudovic@mail.ru

**Asel B. Alexandrova^{1,2}, Irek I. Ziganshin^{3,4}, Rustam R. Khasanov⁵, Stanislav S. Ryazanov⁶,
Almaz M. Sabirzyanov⁷, Elena M. Pudovik⁸**

THE USE OF MULTISPECTRAL IMAGES TO ASSESS LAKE OVERGROWTH

ABSTRACT

The study is devoted to the analysis of overgrowing of 12 lakes in the protected area of Laishevsky Municipal District of the Republic of Tatarstan for 2003–2023 using geoinformation technologies and spectral indices (NDVI, NDWI, MNDWI, WRI) based on Sentinel-2A satellite images. It was found that the overgrowing rate varies from 0.03 to 0.7 ha per year, and its area reaches up to 83 %. The greatest changes were noted at the lakes Freshie, Stolbischche, Chistoe and Sapugoli, which is associated with anthropogenic stress. Overgrowth diagnostics is most effective when using the NDVI, NDWI and MNDWI vegetation indices, while WRI showed low accuracy for small lakes with a water surface area less than 1 ha. For a large lake (area of more 0.7 km²) with overgrowth of less than 10 %, the indicator error is not 2 %, which proves the reliability of observing the specified indices when conducting lake overgrowth. For small lakes with an area less than 0.2 km² and overgrowth of more than 20 % of the area, the error reaches 10–21 %, which requires supplementing with Google Earth Pro data. It is recommended to use NDVI, NDWI and MNDWI indices for large lakes; and to use a combination of methods, including manual digitization, for small lakes with a high degree of overgrowth. The results show the need to adapt remote monitoring methods depending on the size and anthropogenic load on water bodies.

KEYWORDS: vegetation indices, overgrowth, lake, remote sensing of the Earth, satellite images

ВВЕДЕНИЕ

В условиях современного развития геоинформационных технологий методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) приобретают все большую актуальность, особенно с использованием мультиспектральных спутниковых снимков. Ключевыми достоинствами этих методов являются высокая скорость получения данных, возможность многодиапазонного анализа спектральных характеристик и масштабный мониторинг состояния природных объектов [Морозова, 2015; Васильев, Дементьев, 2017; Катаев, Бекеров, 2017; Никитин и др., 2024]. Одним из значимых направлений применения таких технологий является исследование процессов зарастания водоемов высшей водной растительностью, что имеет серьезные экологические последствия.

¹ Institute for Environmental Problems and Subsoil Use of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, 28, Daurskaya str., Kazan, 420087, Russia, e-mail: adabl@mail.ru

² Kazan (Volga Region) Federal University, 18, Kremllyovskaya str., Kazan, 420008, Russia,
e-mail: adabl@mail.ru

³ Institute for Environmental Problems and Subsoil Use of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, 28, Daurskaya str., Kazan, 420087, Russia, e-mail: irek_ziganshin@mail.ru

⁴ Kazan (Volga Region) Federal University, 18, Kremllyovskaya str., Kazan, 420008, Russia,
e-mail: irek_ziganshin@mail.ru

⁵ Institute for Environmental Problems and Subsoil Use of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, 28, Daurskaya str., Kazan, 420087, Russia, e-mail: rustamkhasanov88@gmail.com

⁶ Institute for Environmental Problems and Subsoil Use of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, 28, Daurskaya str., Kazan, 420087, Russia, e-mail: rstanislav.soil@yandex.ru

⁷ Kazan (Volga Region) Federal University, 18, Kremllyovskaya str., Kazan, 420008, Russia,
e-mail: sabiralmaz@mail.ru

⁸ Kazan (Volga Region) Federal University, 18, Kremllyovskaya str., Kazan, 420008, Russia,
e-mail: epudovic@mail.ru

Процесс зарастания водоемов представляет собой динамическое явление, характеризующееся формированием концентрических зон растительности, таких как тростник и рогоз, которые распространяются от литорали к пелагической зоне. Этот феномен обусловлен градиентами освещенности, неоднородностью донных отложений, а также изменениями химических и термических параметров водной среды [Флерко и др., 2015].

Несмотря на наличие научного интереса к морфометрии озер, вопросы, связанные с анализом их зарастания, остаются недостаточно исследованными [Зиганишин и др., 2018]. Традиционно для таких исследований используются снимки системы Google Earth Pro, однако их применение ограничивается дефицитом пространственно-временных данных с достаточным разрешением для конкретных регионов. В этой связи возрастаает необходимость применения мультиспектральных спутниковых данных, таких как Sentinel-2A, которые обеспечивают высокую детализацию и покрытие даже для малых водных объектов площадью до 1 га. Более того, мультиспектральные индексы показывают свою эффективность в классификации растительных сообществ [Морозова, 2015; Васильев, Дементьев, 2017; Катаев, Бекеров, 2017; Sabirzyanov, 2020; Никитин и др., 2024], однако их адаптация для мониторинга зарастания малых озер требует дальнейшей разработки.

Целью нашего исследования является оценка динамики зарастания озер на основе комплексного анализа мультиспектральных спутниковых данных. Задачи работы:

1. Провести сравнительный анализ изменений степени зарастания озер с использованием снимков системы Google Earth Pro за 2003 и 2023 гг.
2. На основе анализа временных рядов мультиспектральных данных дистанционного зондирования Земли, полученных с космического аппарата Sentinel-2A, определить возможную для диагностики процессов зарастания минимальную площадь водного объекта (озера).
3. Определить индексы, обладающие максимальной информативностью для идентификации зон распространения высшей водной растительности в условиях малых водоемов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования являлись 12 озер, имеющих статус особо охраняемых природных территорий (ООПТ) — памятников природы регионального значения Лаишевского муниципального района Республики Татарстан (РТ) (рис. 1). Данный район располагается в приграничном расположении от республиканской столицы — г. Казани, в юго-западной части Предкамья Республики Татарстан и находится на месте слияния двух крупных рек — на левом берегу р. Волги и правом берегу р. Камы.

Климатическая характеристика исследуемого региона определяется среднегодовой температурой, которая составляет 2,2 °C. Многолетняя средняя сумма осадков в данной местности достигает 555 мм. В июле средняя температура воздуха фиксируется на уровне 18,8 °C. Район отличается высоким количеством разнообразных озер, которые имеют преимущественно карстовое и суффозионно-карстовое происхождение.

На исследуемых территориях района почвенный покров представлен в основном серыми лесными и дерново-подзолистыми почвами. Растительность вокруг озер сохранилась в виде смешанных лесных угодий, которые занимают 8,7 % от общей площади, а также в виде луговых массивов, расположенных вдоль крутых склонов и балок. Наблюдаются типчаково-мятликовые, разнотравные и полевице-мятликовые растительные сообщества [Ермолаев и др., 2007; Переведенцев и др., 2018].

Лаишевский муниципальный район является сельскохозяйственным районом. Площадь земель сельскохозяйственного назначения составляет 81,6 тыс. га. В последние годы в районе сильно начала развиваться пригородная жилая застройка из-за близости к столице

региона, что, безусловно, приводит к изменению состояния водных ресурсов. Это особенно опасно для озер, расположенных рядом с такими перспективными застраиваемыми территориями, куда относятся территории исследуемых нами озер.

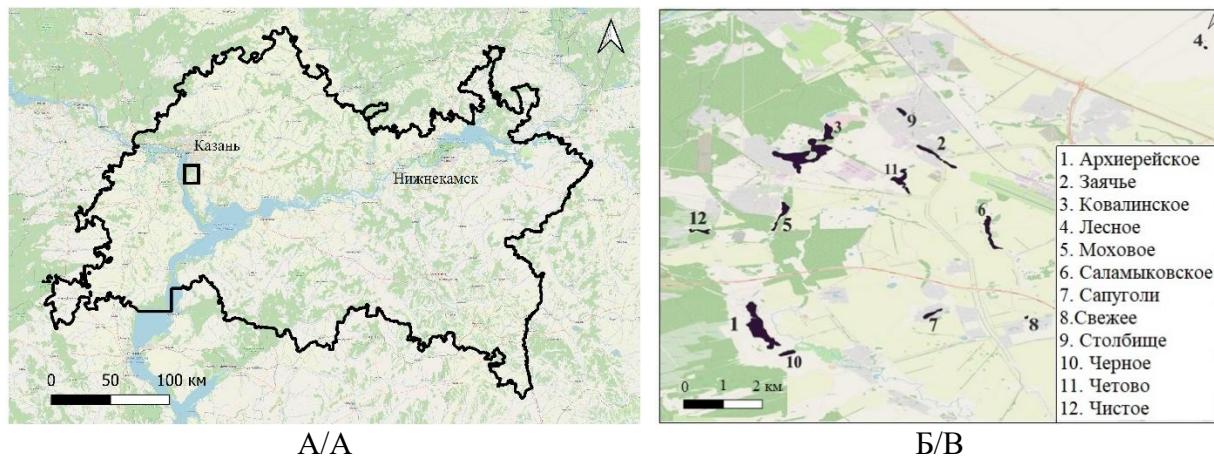


Рис. 1. Расположение озер ООПТ Лайшевского муниципального района (Б) в границах Республики Татарстан (А)

Fig. 1. The location of the lakes of the protected area of Laishevsky Municipal District (A) within the borders of the Republic of Tatarstan (B)

Динамика зарастания озер была исследована с использованием спутниковых снимков, полученных в 2003 и 2023 гг., в программе Google Earth Pro.¹ Для анализа динамики изменения пространственных данных создавались векторные слои, отображающие контуры береговой линии и водного зеркала для каждого из исследуемых озер. Исходный файл с векторными слоями был сохранен в формате KML и использован для расчета площадей векторных слоев, а также для создания карт в программе QGIS 3.26. При построении карт озер использовались маски, вырезанные с исходной карты OpenStreetMap (OSM).

В дальнейшем проводились расчеты площадей векторных слоев, которые были систематизированы в табличном формате с использованием программы Excel. Площадь зарастания озер определялась как разность между площадями, соответствующими «берегу озера» и «водному зеркалу». Статистические параметры исследуемых объектов были вычислены с применением программного обеспечения Statistica 8.0.

В данной работе использовались спутниковые снимки, полученные с помощью спутника Sentinel-2A, доступные на сайте Геологической службы США (USGS)², охватывающие период с апреля по октябрь 2023 г. Итоговый набор данных состоял из 27 папок со снимками Sentinel-2A. Для анализа зарастания озер применялись следующие индексы [Морозова, 2015; Катаев, Бекеров, 2017]:

1. NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) — нормализованный разностный вегетационный индекс, который позволяет оценить плотность растительности. Для растительных объектов значения NDVI находятся в диапазоне от 0,2 до 1, что указывает на наличие растительности.
2. NDWI (Normalized Difference Water Index) — нормализованный разностный водный индекс, используемый для идентификации поверхностных вод в условиях

¹ Google Earth Pro. Электронный ресурс: <https://www.google.com/intl/ru/earth/about/versions/> (дата обращения 02.02.2025)

² Геологическая служба США (USGS). Электронный ресурс: <https://www.usgs.gov/> (дата обращения 02.02.2025)

заболоченности и для оценки степени их покрытия. Значения данного индекса варьируются от -1 до 1 , при этом для водных объектов они составляют от $0,2$ до 1 .

3. MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) — модифицированный нормализованный разностный водный индекс, предназначенный для обнаружения водных объектов. Диапазон значений данного индекса также составляет от -1 до 1 , при этом значения выше 0 указывают на наличие воды.
4. WRI (Water Ratio Index) — индекс влагостойкости, который используется для анализа физиологических характеристик экосистемы и для выявления водных объектов на исследуемой территории. Значения WRI колеблются от 0 до 3 , при этом значения, равные 1 и выше, характерны для водных объектов.

Расчет индексов проводился в программе QGIS 3.26 с использованием калькулятора растров, где были выбраны каналы растров для длин волн следующих диапазонов: Band 3 (Green), Band 4 (Red), Band 8 (NIR) и Band 12 (SWIR 2). Общепринятые формулы для расчета вегетационных индексов следующие:

- NDVI = $(\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red})$;
- NDWI = $(\text{NIR} - \text{SWIR 2}) / (\text{NIR} + \text{SWIR 2})$;
- MNDWI = $(\text{Green} - \text{SWIR 2}) / (\text{Green} + \text{SWIR 2})$;
- WRI = $(\text{Green} + \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{SWIR 2})$.

Составленные карты с рассчитанными индексами изначально представляли собой изображения в градациях серого. Для улучшения визуализации карты были переработаны в цветном исполнении, соответствующем установленным пограничным значениям индексов: $\text{NDVI} < 0,2$; $\text{NDWI} > 0,2$; $\text{MNDWI} > 0$; $\text{WRI} > 1$. В легенде картографических материалов, охватывающих территорию озер особо охраняемой природной территории (ООПТ) Лаишевского муниципального района Республики Татарстан, индексы были классифицированы на пять градаций. Основным методом создания картографических материалов для озер послужила ручная оцифровка, что обеспечило высокую точность и детальность представленных данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В исследовании представлены карты спектральных индексов, сформированные для июля, что обусловлено гидрологическим режимом водных объектов, характеризующимся минимальным уровнем воды (межень). Данный период, согласно научным источникам, является оптимальным для мониторинга динамики зарастания, т. к. снижение водности способствует визуализации процессов вегетации.

На картах хорошо диагностируется характер зарастания озер (рис. 2).

Установлено, что:

- относительно равномерное зарастание по периметру наблюдается у оз. Столбище и оз. Сапуголи;
- островное зарастание характерно для оз. Заячье и оз. Моховое;
- сплошное зарастание выявлено на оз. Четово;
- локальное зарастание на периферии отмечено у оз. Архиерейское и оз. Ковалинское;
- С-образное зарастание наблюдается у оз. Лесное.

В течение последних 20 лет в результате увеличения площадей застройки и расширения садоводческих товариществ значительные площади зарастания были зафиксированы у озер Свежее, Столбище, Чистое и Сапуголи. За период 2003–2023 гг. площадь исследованных озер изменилась от 1 до 104 га, и в среднем составила 23,1 га.

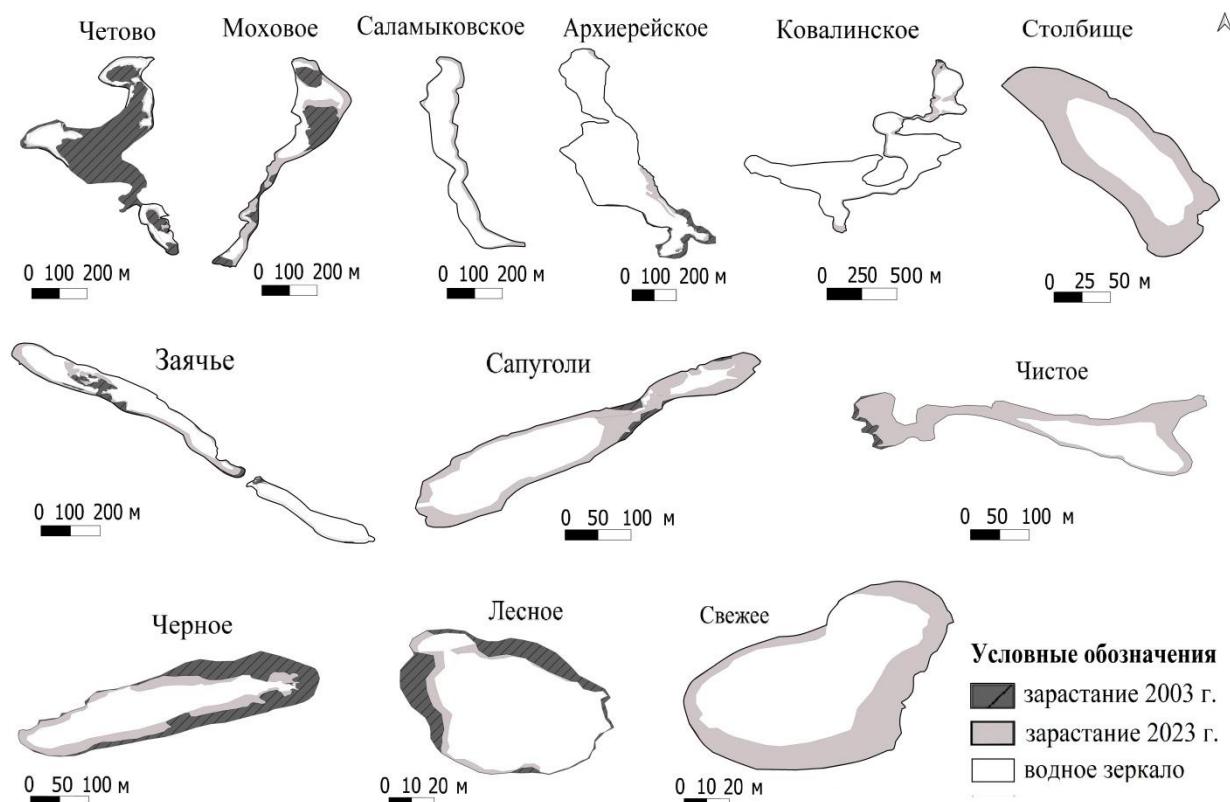


Рис. 2. Карты застарания озер ООПТ Лайшевского муниципального района РТ

Fig. 2. Maps of lake overgrowth in protected areas of the Laishevsky Municipal District of the Republic of Tatarstan

Озера были систематизированы по классам следующим образом:

1. В категорию «небольшие озера» с площадью 1–10 км² вошло только одно озеро — оз. Ковалинское.
2. В категорию «малые озера» с площадью чаши 0,1–1 км² были выделены пять озер: Саламыковское, Моховое, Архиерейское, Заячье и Четово.
3. В категорию «маленькие озера» с площадью чаши 0,01–0,1 км² входят шесть озер: Лесное, Свежее, Черное, Сапуголи, Столбище и Чистое.

Установлено, что меньшие по размеру озера более подвержены процессам застарания, что может оказывать влияние на экосистему и биоразнообразие в регионе. Исследование пространственно-временных изменений застарания озер по спектральным снимкам подтвердили картину застарания озер ООПТ Лайшевского муниципального района РТ (рис. 3).

Согласно проведенным исследованиям, значения NDVI в пределах изучаемых озер в июле колебались от -0,368 до 0,866. На картах водные поверхности отображаются коричневыми оттенками, указывая на области с индексом менее 0,2, что соответствует зеркалу озер. Участки, где озера частично покрыты растительностью, имеют значения индекса выше 0,357. Интенсивное застарание поверхности озер растительностью зафиксировано в диапазоне индексов от 0,357 до 0,866, что характерно для таких озер, как Четово, Моховое, Столбище и Черное.

Индекс NDWI в июле варьировался от -0,545 до 0,932. Водные поверхности, отображенные на картах фиолетовыми и темно-фиолетовыми оттенками, характеризуются индексом выше 0,2. При этом на участках застарания озерных чащ значения индекса

составляют менее 0,04. Для интенсивной вегетации на поверхности водоемов диапазон индекса находится в пределах от 0,04 до 0,545. Светло-голубые оттенки на окраинах чащ озер, наблюдавшиеся в июле, типичны для мелких озер, таких как оз. Черное и оз. Сапуголи.

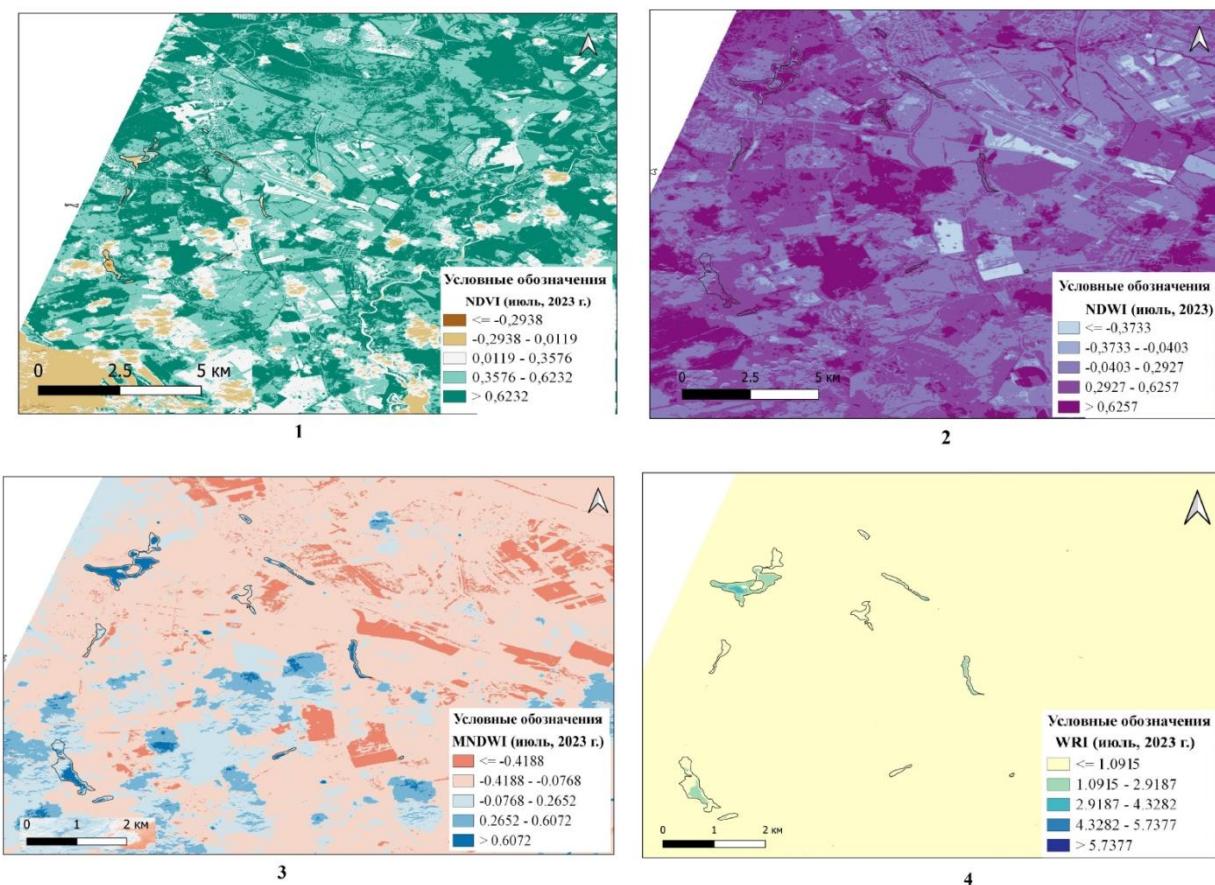


Рис. 3. Карты территории озер, расположенных на территории ООПТ Лайшевского муниципального района Республики Татарстан, по индексам: NDVI (1), NDWI (2), MNDWI (3) и WRI (4) за июль 2023 г.

Fig. 3. Maps of the territory of lakes in protected areas of the Laishevsky Municipal District of the Republic of Tatarstan by index: NDVI (1) NDWI (2) MNDWI (3) WRI (4) for July 2023

В пределах исследуемых озер значения индекса MNDWI в июле варьировались от –0,496 до 0,956. Водные поверхности представлены на картах светло-голубыми, голубыми и синими оттенками, что соответствует индексам больше нуля. Зарастающие участки на границах озерных чащ имеют отрицательные значения индекса, отображаясь на картах светло-розовыми и розовыми областями. Индекс MNDWI четко разделяет зоны водного зеркала (как «вода») и заросшие территории (как «не вода»), что характерно для таких озер, как Четово, Столбище, Моховое и Сапуголи.

Значения индекса WRI в июле колебались от 0,176 до 5,749. Светло-голубые и синие оттенки на картах указывают на водные поверхности с индексом выше 1. Этот индекс позволяет визуализировать водные поверхности мелких озер, таких как Ковалинское, Архиерейское, Саламыковское и Заячье. Однако для таких озер, как Четово, Моховое, Сапуголи, Свежее и Столбище, водная поверхность либо не фиксируется, либо отображается как слабозаметные светло-голубые участки на желтом фоне [Александрова, 2025]. Например, оз. Четово, четко идентифицируемое по индексу MNDWI, практически не

обнаруживается на картах с индексом WRI, что указывает на ограниченную применимость последнего для некоторых озер, особенно при низкой отражательной способности.

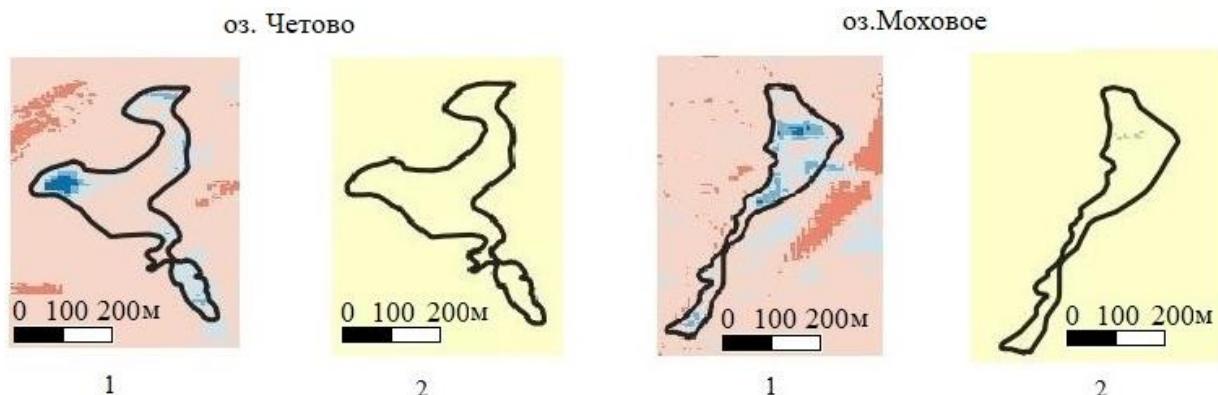


Рис. 4. Озера Четово и Моховое Лайшевского муниципального района РТ по индексам за июль 2023 г: 1 — MNDWI (водная поверхность диагностируется по синему и светло-голубому цвету); 2 — WRI (водная поверхность не идентифицируется)

Fig. 4. Lakes Chetovo and Mokhovoe of the Laishevsky Municipal District of the Republic of Tatarstan according to the indices for July 2023: 1 — MNDWI (the water surface is diagnosed by blue and light blue); 2 — WRI (the water surface is not identified)

С целью определения наиболее эффективного спектрального индекса для диагностики зарастания был проведен сравнительный анализ карт, созданных с использованием метода дискретной интерполяции. Результаты анализа показывают значительную вариативность интерпретационных возможностей различных индексов, что подчеркивает необходимость их селективного использования в зависимости от характеристик исследуемых объектов. Это указывает на то, что выбор индекса должен основываться на специфических условиях и особенностях каждого озера, чтобы обеспечить наиболее точные и достоверные результаты диагностики зарастания (рис. 5).

На картах, созданных с использованием индексов NDVI, NDWI и MNDWI, процесс зарастания оз. Лесное, являющегося самым маленьким среди изучаемых озер, четко прослеживается по периферийным зонам. Установлено, что диагностика зарастания озер наиболее эффективно осуществляется с помощью вегетационного индекса NDVI, а также водных индексов NDWI и MNDWI. В то же время индекс WRI показал низкую эффективность при определении водного зеркала озер, особенно для небольших водоемов площадью менее 1 га, что подтверждается примером оз. Лесное.

Анализ спектральных индексов NDVI, NDWI и MNDWI выявил различия в их диагностической точности при исследовании водных поверхностей озер, расположенных на территории ООПТ Лайшевского муниципального района, в выбранный период. Во время оцифровки границ водных поверхностей было отмечено совпадение данных индексов NDWI и MNDWI, что свидетельствует об их высокой информативности. Индекс MNDWI показал наибольшую точность, поэтому дальнейшее картографирование проводилось на основе индексов NDVI и MNDWI.

В результате были созданы карты, отображающие водные поверхности озер с использованием спутниковых снимков Google Earth Pro и индексов NDVI и MNDWI. Наиболее информативными оказались карты, фиксирующие изменения водного зеркала небольших озер. Примеры точного определения границ водных поверхностей, оцифрован-

ных с помощью значений индексов NDVI и MNDWI, представлены на рис. 6. Несовпадение границ особенно заметно на озерах площадью 1 га, 7 га и 14 га.

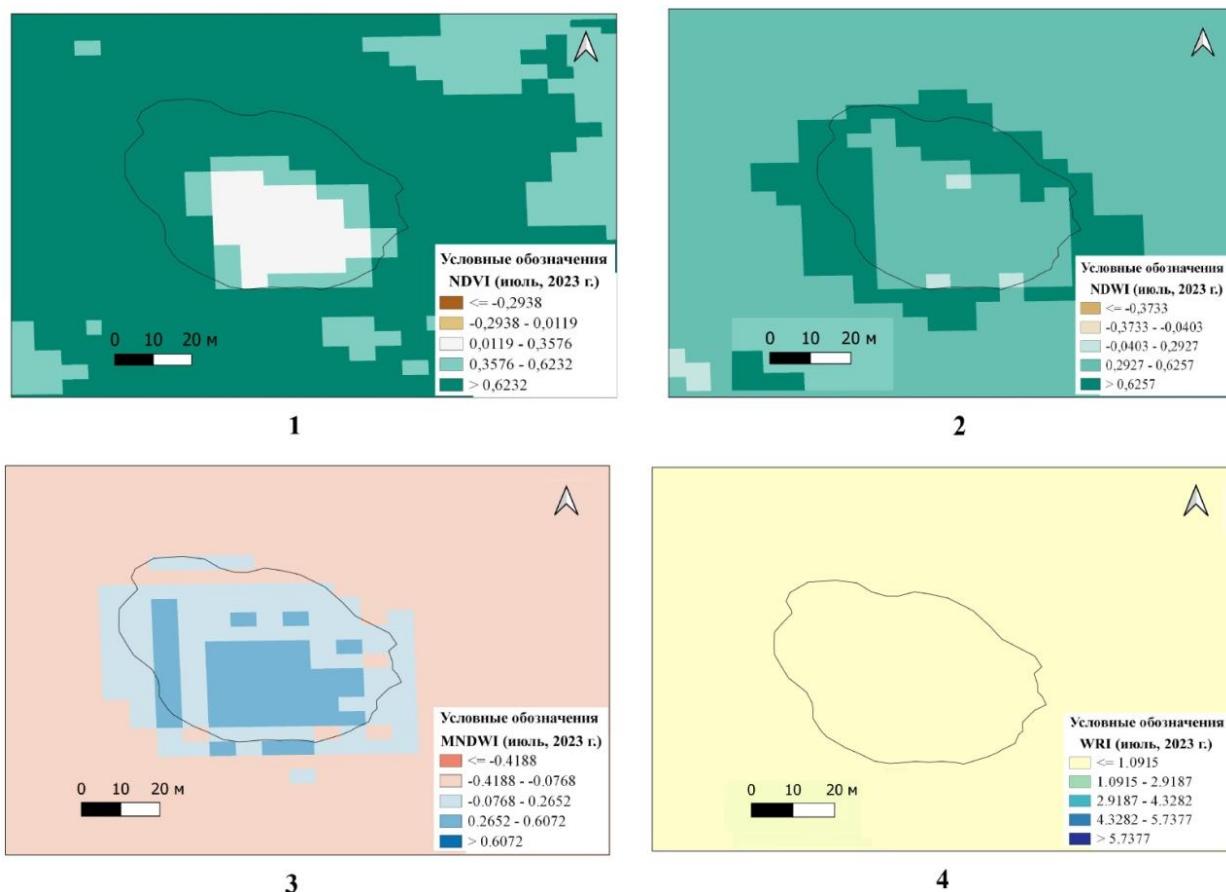


Рис. 5. Диагностика зарастания озера Лесное по индексам:

1) NDVI; 2) NDWI; 3) MNDWI; 4) WRI

Fig. 5. Diagnostics of Lesnoye Lake overgrowth by indexes:

1) NDVI; 2) NDWI; 3) MNDWI; 4) WRI

На озерах с площадью чаши более 1 км^2 различия в площадях водного зеркала, оцифрованных по снимкам Google Earth Pro и индексам NDVI и MNDWI, действительно оказываются незначительными. Это свидетельствует о высокой согласованности между этими методами диагностики водного зеркала для крупных водоемов. Площадь водного зеркала, определенная с использованием индексов NDVI и MNDWI, также совпадает, что подтверждает их эффективность в анализе состояния водных объектов.

С помощью геоинформационной системы QGIS 3.26 были установлены различия площадей водного зеркала озер, полученных путем оцифровки с использованием различных индексов. Эти данные позволяют более детально оценить эффективность каждого из индексов в диагностике водных объектов и выявить возможные ограничения при работе с меньшими водоемами. Результаты анализа приведены в табл. 1, где указаны площади водного зеркала, оцифрованные по каждому из индексов, что может служить основой для дальнейших исследований и улучшения методов мониторинга водных ресурсов.

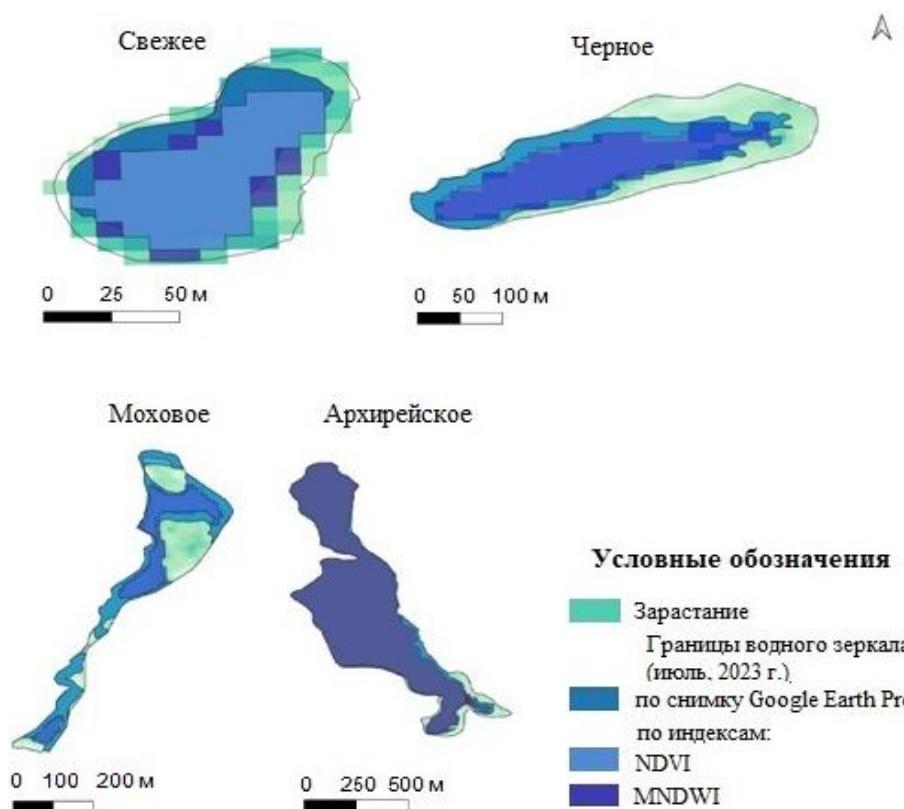


Рис. 6. Карта изменения границ водного зеркала озер по индексам NDVI и MNDWI

Fig. 6. Map of changes in the boundaries of the water mirror of lakes according to the NDVI and MNDWI indices.

Табл. 1. Различия площадей водного зеркала озер ООПТ Лайшевского района РТ оцифрованных с помощью спектральных индексов NDVI и MNDWI [Александрова, 2025]

Table 1. Differences in the areas of the water mirror of lakes in protected areas of the Laishevsky District of the Republic of Tatarstan digitized using the spectral indexes NDVI and MNDWI [Aleksandrova, 2025]

Озеро	S чаши озера, га	Зарастание, %	Δ NDVI, %	Δ MNDWI, %
Четово	19,9	83,1	21,1	18,9
Моховое	14,5	65,0	15,0	14,4
Столбище	5,2	58,5	16,1	15,4
Черное	7,7	55,3	15,1	14,4
Сапуголи	7,6	42,0	12,4	10,2
Свежее	1,1	38,4	18,2	16,6
Заячье	15,2	29,2	10,3	8,2
Лесное	1,0	27,7	16,6	15,3
Саламыковское	20,1	19,4	7,7	8,9
Архиерейское	74,8	11,7	1,5	1,8
Ковалинское	104,4	10,6	1,4	1,7

Примечание: Δ — различия

Исследования показали, что для озер площадью от 70 до 100 га с уровнем зарастания водной поверхности менее 10 % ошибка в диагностике водного зеркала с применением индексов NDVI и MNDWI в течение анализируемого периода составляет менее 2 %. Это свидетельствует о том, что данные индексы могут эффективно использоваться для оценки водных объектов площадью выше $0,7 \text{ км}^2$. В частности, для оз. Архиерейское и оз. Ковалинское ошибка в определении зарастания и водного зеркала по вегетационным индексам NDVI, NDWI и MNDWI не превышает 2 %.

Для озер с высоким уровнем зарастания (выше 50 %) ошибка диагностики с использованием индекса NDVI колеблется от 14,4 % до 21 %. Наибольшая степень ошибки наблюдается для оз. Четово. Для водоемов, где более половины поверхности покрыто растительностью, ошибка диагностики не превышает 16 %, что было установлено для озер Моховое, Столбище и Черное. В этой связи для озер с высоким уровнем зарастания рекомендуется применять космические снимки Sentinel-2A, что позволит снизить ошибки в оценке площадей зарастания и определении границ водного зеркала.

Для водоемов площадью 1 га и менее также наблюдаются значительные ошибки в диагностике водного зеркала, которые варьируются от 15 % до 18 %, что было зафиксировано на оз. Лесное и оз. Свежее. Таким образом, исследование озер различных размеров демонстрирует разные возможности применения индексов NDVI, NDWI и MNDWI для оценки площадей зарастания. В случае больших озер с минимальным уровнем зарастания индексы показывают высокую точность, в то время как диагностика водных объектов с высоким уровнем зарастания (более 50 %) приводит к ошибкам в диапазоне от 7,7 % до 21 %.

ВЫВОДЫ

В ходе исследования проанализированы изменения площадей зарастания озер на территории ООПТ Лайшевского района Республики Татарстан с применением геоинформационных технологий. Определены площадь и скорость зарастания озер за период в 21 год (2003–2023 гг.). По данным дистанционного зондирования, уровень зарастания озер за указанный период колебался от 10 % до 83 %. Скорость зарастания варьируется от 0,03 до 0,7 га в год.

Проведен математический анализ изменений площадей зарастания озер на основе данных дистанционного зондирования с использованием спектральных индексов. Рассчитаны индексы NDVI, NDWI, MNDWI и WRI по космическим снимкам Sentinel-2A за 2023 г. Зарастание озер эффективно диагностируется с помощью вегетационного индекса NDVI и водных индексов NDWI и MNDWI, в то время как индекс WRI не обеспечивает надежной диагностики для водных объектов площадью менее 1 га.

Созданы карты, отображающие изменения зарастания озер, основанные на временных снимках и спектральных индексах NDVI и MNDWI. Установлена возможность диагностики водных объектов в зависимости от их площади и уровня зарастания. Минимальная ошибка (2 %) наблюдается для озер площадью более $0,7 \text{ км}^2$ с низким уровнем зарастания. Наибольшая ошибка (10–21 %) отмечается для озер площадью менее $0,2 \text{ км}^2$ с высоким уровнем зарастания (20–80 %).

Данное исследование направлено на устранение недостатков в методах мониторинга малых водных объектов и на расширение инструментов экологического контроля с использованием технологий дистанционного зондирования. Полученные результаты позволяют оптимизировать методику мониторинга, учитывая пространственные ограничения и спектральные характеристики таких экосистем.

Для озер площадью более $0,7 \text{ км}^2$ и с застаемостью менее 10 % можно эффективно использовать как вегетационный индекс NDVI, так и спектральные водные индексы NDWI

и MNDWI для диагностики водного зеркала. Эти индексы обеспечивают высокую точность в определении водных поверхностей и их характеристик.

Для водных объектов с площадью водного зеркала менее 0,2 км² и застаемостью более 20 % использование вегетационного индекса NDVI и водных индексов NDWI и MNDWI может привести к увеличению риска получения неверных площадных характеристик. Это, в свою очередь, может вызвать ошибки в интерпретации принадлежности участков к различным категориям земель и повлечь изменения в правовом статусе этих земель. Для мелких и сильно заросших водоемов необходимо применять более аккуратные и адаптированные методы диагностики, чтобы минимизировать возможные ошибки и обеспечить корректность оценок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Александрова А. Б. Космические технологии в оценке состояния водных ресурсов регионов. Казань: КФУ, 2025. 111 с.
- Васильев К. К., Дементьев В. Е. Представление и обработка спутниковых многозональных изображений. Ульяновск: УлГТУ, 2017. 254 с.
- Ермолаев О. П., Игонин М. Е., Бубнов А. Ю., Павлова С. В. Ландшафты Республики Татарстан: региональный ландшафтно-экологический анализ. Казань: Слово, 2007. 411 с.
- Зиганишин И. И., Иванов Д. В., Хасанов Р. Р. Анализ динамики морфометрических показателей озер-памятников природы на территории Республики Татарстан. Российский журнал прикладной экологии, 2018. № 2. С. 17–20.
- Катаев М. Ю., Бекеров А. А. Методика обнаружения водных объектов по многоспектральным спутниковым измерениям. Доклады ТУСУР, 2017. Т. 20. № 4. С. 105–108. DOI: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-105-108.
- Морозова В. А. Расчет индексов для выявления и анализа характеристик водных объектов с помощью данных дистанционного зондирования. Современные проблемы территориального развития, 2019. № 2. Электронный ресурс: <https://www.terjournal.ru> (дата обращения 03.04.2025).
- Никитин О. В., Степанова Н. Ю., Кондратьева Т. А., Кузьмин Р. С., Латыпова В. З. Пространственно-временная динамика «цветения» фитопланктона в Куйбышевском водохранилище по данным спутникового зондирования. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2024. Т. 21. № 6. С. 284–293. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-284-293.
- Переведенцев Ю. П., Шерстюков Б. Г., Наумов Э. П., Верещагин М. А., Шанталинский К. М. Климатические условия и ресурсы Республики Татарстан. Казань: Издательство Казанского государственного университета, 2008. 288 с.
- Флерко Т. Г., Валова З. Г., Павловский А. И. Гидрология озер и водохранилищ: терминологический словарь. Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2015. 44 с.
- Sabirzyanov A., Panasyuk M., Trofimov N., Sochneva S. GIS-technology and Data of Earth Remote Sensing to Identify and Predict Ravine Erosion Development. Bio Web of Conferences. International Scientific and Practical Conference “Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources” (FIES 2020). EDP Sciences, 2020. P. 00113.

REFERENCES

- Aleksandrova A. B. Space Technologies in Assessing the State of Water Resources of Regions. Kazan: Kazan (Volga Region) Federal University, 2025. 111 p. (in Russian).
- Ermolaev O. P., Igonin M. E., Bubnov A. Yu., Pavlova S. V. Landscapes of the Republic of Tatarstan: Regional Landscape-Ecological Analysis. Kazan: Slovo, 2007. 411 p. (in Russian).
- Flerko T. G., Valova Z. G., Pavlovsky A. I. Hydrology of Lakes and Reservoirs: Terminological Dictionary. Gomel: Frantsysk Skaryna Gomel State University, 2015. 44 p. (in Russian).
- Kataev M. Yu., Bekerov A. A. Methodology for Detecting Water Bodies Using Multispectral Satellite Measurements. Proceedings of TUSUR University, 2017. V. 20. No. 4. P. 105–108 (in Russian). DOI: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-105-108.
- Morozova V. A. Calculation of Indices for Identification and Analysis of Characteristics of Water Bodies Using Remote Sensing Data. Current Problems of Territorial Development, 2019. No. 2. Web resource: <https://www.terjournal.ru> (accessed 03.04.2025) (in Russian).
- Nikitin O. V., Stepanova N. Yu., Kondratieva T. A., Kuzmin R. S., Latypova V. Z. Spatio-Temporal Dynamics of Phytoplankton “Blooming” in the Kuibyshev Reservoir Based on Satellite Sensing Data. Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space, 2024. V. 21. No. 6. P. 284–293 (in Russian). DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-284-293.
- Perevedentsev Yu. P., Sherstyukov B. G., Naumov E. P., Vereshchagin M. A., Shantalinsky K. M. Climatic Conditions and Resources of the Republic of Tatarstan. Kazan: Publishing House of Kazan (Volga Region) Federal University, 2008. 288 p. (in Russian).
- Sabiryanov A., Panasyuk M., Trofimov N., Sochneva S. GIS-technology and Data of Earth Remote Sensing to Identify and Predict Ravine Erosion Development. Bio Web of Conferences. International Scientific and Practical Conference “Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources” (FIES 2020). EDP Sciences, 2020. P. 00113.
- Vasiliev K. K., Dementiev V. E. Presentation and Processing of Satellite Multispectral Images. Ulyanovsk: Ulyanovsk State Technical University, 2017. 254 p. (in Russian).
- Ziganшин I. I., Ivanov D. V., Khasanov R. R. Analysis of the Dynamics of Morphometric Indicators of Lakes-Natural Monuments in the Republic of Tatarstan. Russian Journal of Applied Ecology, 2018. No. 2. P. 17–20 (in Russian).