

УДК: 528.8

Суюмкулов А.А., Мамырбеков М.Т.,
Жумалиев К.М., Исмаилов Д.А.,
Жээнбеков А.А.
*Институт сейсмологии НАН КР,
г.Бишкек, Кыргызская Республика*

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ГИС ДЛЯ АНАЛИЗА СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ ТОКТОГУЛЬСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Аннотация. В работе исследованы изменения площади водной поверхности Токтогульского водохранилища, крупнейшего гидроэнергетического объекта Кыргызской Республики, по данным спутниковых наблюдений за 2015–2024 гг. В качестве исходной информации использованы космические снимки серии Landsat. Обработка изображений выполнена в геоинформационной среде с применением спектрального водного индекса NDWI и метода пороговой сегментации, позволяющих выделить границы водной поверхности.

На основе полученных результатов построены векторные двумерные и трёхмерные модели акватории водохранилища, отражающие изменения площади водной поверхности в исследуемый период. Анализ спутниковых данных показал, что площадь водохранилища в 2015–2024 гг. изменялась в пределах 178–280 км² и характеризуется выраженными сезонными и межгодовыми колебаниями. Наиболее заметное сокращение площади водной поверхности наблюдается в осенне-зимний период.

Выявленные изменения обусловлены совокупностью природных и хозяйственных факторов, включая межгодовую изменчивость атмосферных осадков, особенности климатических условий, а также режим использования водных ресурсов водохранилища для выработки электроэнергии в периоды повышенного энергопотребления. Полученные результаты подтверждают эффективность применения данных дистанционного зондирования и ГИС-технологий для мониторинга состояния и динамики крупных водохранилищ.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, технология QGIS, спутниковые снимки, геоинформационные системы (ГИС), Токтогульское водохранилище.

ТОКТОГУЛ СУУ САКТАГЫЧЫНЫН СПУТНИКТЕН ТАРТЫЛГАН СҮРӨТТӨРҮН АНАЛИЗДӨӨ ҮЧҮН GIS ТЕХНОЛОГИЯСЫН КОЛДОНУУ

Аннотация. Бул статьяда 2015-2024 — жылдардагы спутниктик байкоолордун маалыматтары боюнча Токтогул суу сактагычынын — Кыргыз Республикасынын эң ири гидроэнергетикалык объектисинин суу бетинин аянтынын өзгөрүшү изилденген. Сүрөттөлүштөрдү иштеп чыгуу геомаалыматтык чөйрөдө суу спектрдик индексин колдонуу менен жана суу бетинин чектерин бөлүп көрсөтүүгө мүмкүндүк берүүчү чектик сегментациялоо методу менен аткарылган.

Алынган натыйжалардын негизинде изилденүүчү мезгилде суу бетинин аянтынын өзгөрүшүн чагылдыруучу суу сактагычтын акваториясынын эки өлчөмдүү жана үч өлчөмдүү вектордук моделдери курулган. Спутниктик маалыматтарды талдоо көрсөткөндөй, суу сактагычтын аянты 2015-2024-жылдары 178-280 км² чегинде өзгөргөн жана сезондуу жана жыл аралык айкын өзгөрүүлөр менен мүнөздөлөт. Суу бетинин аянтынын эң көрүнүктүү кыскаруусу күз-кыш мезгилинде байкалат.

Изилдөөдө негизги табигый өзгөрүүлөр жана чарбалык иштердин факторлорунун жыйындысы менен шартталган, анын ичинде атмосфералык жаан-чачындардын жыл аралык өзгөрүлмөлүүлүгү, климаттык шарттардын өзгөчөлүктөрү, ошондой эле энергияны

жогорку керектөө мезгилинде электр энергиясын иштеп чыгуу үчүн суу сактагычтын суу ресурстарын пайдалануу режими белгиленген. Жыйынтыктар ири суу сактагычтардын абалын жана динамикасын көзөмөлдөө үчүн аралыктан зонддоо маалыматтарын жана ГИС технологияларын колдонуунун натыйжалуулугун тастыктайт.

Негизги сөздөр: жерди аралыктан зонддоо, QGIS-технологиясы, спутниктик сүрөттөр, геомаалыматтык системалар (ГИС), Токтогул суу сактагычы.

APPLICATION OF GIS TECHNOLOGY FOR ANALYSIS OF SATELLITE IMAGES OF THE TOKTOGUL RESERVOIR

Abstract. The paper examines changes in the water surface area of the Toktogul reservoir, the largest hydropower facility in the Kyrgyz Republic, according to satellite observations for 2015-2024. The satellite images of the Landsat series were used as the initial information. Image processing was performed in a geoinformational environment using the NDWI spectral water index and the threshold segmentation method, which make it possible to distinguish the boundaries of the water surface.

Based on the results obtained, vector two-dimensional and three-dimensional models of the reservoir water area were constructed, reflecting changes in the water surface area during the study period. Analysis of satellite data showed that the reservoir area in 2015-2024 varied between 178-280 km² and is characterized by pronounced seasonal and interannual fluctuations. The most noticeable reduction in the area of the water surface is observed in the autumn-winter period.

The revealed changes are due to a combination of natural and economic factors, including the interannual variability of atmospheric precipitation, the peculiarities of climatic conditions, as well as the mode of using the reservoir's water resources to generate electricity during periods of increased energy consumption. The results obtained confirm the effectiveness of using remote sensing data and GIS technologies to monitor the condition and dynamics of large reservoirs.

Keywords: remote sensing of the Earth, QGIS technology, satellite imagery, geographic information systems (GIS), Toktogul reservoir.

ВВЕДЕНИЕ

Спутниковые данные, полученные методами дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), представляют собой важный источник информации об объектах, территориях и природных явлениях на поверхности Земли и формируются на основе анализа данных, регистрируемых специальной аппаратурой без непосредственного контакта с исследуемыми объектами [1].

Методы ДЗЗ позволяют формировать информационные базы данных, содержащие пространственные, спектральные и временные характеристики наблюдаемых объектов, что обеспечивает возможность их использования при решении задач рационального природопользования.

Данные дистанционного зондирования широко применяются в различных областях науки и хозяйственной деятельности, включая сельское хозяйство, геологию, гидрологию, лесное хозяйство, экологический мониторинг, территориальное планирование и сейсмологию [2]. Такие данные могут регистрироваться в различных диапазонах электромагнитного спектра — не только в видимом, но также в ультрафиолетовом, инфракрасном и микроволновом.

Для анализа данных ДЗЗ и их практического использования необходимы эффективные средства обработки и управления пространственной информацией. Одним из таких средств являются геоинформационные системы (ГИС), представляющие собой

программно-аппаратные комплексы, предназначенные для сбора, хранения, обработки, анализа и визуализации пространственных данных, включая материалы дистанционного зондирования Земли [3]. В геоинформационных системах объединяются исходные данные, алгоритмы их обработки, программные средства анализа и базы данных, обеспечивающие доступ и хранение информации.

Функционирование ГИС основано на взаимодействии нескольких основных компонентов:

1. Вычислительная техника и операционная среда.
2. Специализированное программное обеспечение (ГИС-пакеты).
3. Пространственные данные, включая спутниковые изображения и результаты их обработки.
4. Средства хранения и управления данными.
5. Экспериментальные и измерительные данные.
6. Базы данных, содержащие характеристики объектов и процессов.

Материалы дистанционного зондирования широко используются для решения различных прикладных задач, в том числе для мониторинга водных ресурсов. Для выделения водных объектов по спутниковым изображениям применяются различные методы.

Визуально-инструментальный метод.

Данный метод основан на визуальной интерпретации спутниковых изображений специалистом. Эксперт выполняет дешифрирование снимков и с помощью инструментов оцифровки, доступных в программных продуктах обработки геоданных (например, QGIS, ArcGIS, MapInfo), вручную выделяет границы водных объектов.

Пороговый метод с использованием спектральных индексов.

Для автоматизированного выявления различных типов земного покрова широко применяются спектральные индексы. Для детектирования водных объектов наиболее эффективным является нормализованный разностный водный индекс NDWI. Данный индекс позволяет выделять водные поверхности благодаря различиям отражательной способности воды, почвы и растительности в зелёном и ближнем инфракрасном диапазонах спектра [4].

Актуальность исследования обусловлена необходимостью оперативного мониторинга состояния водных ресурсов. В частности, это относится к анализу изменения водной поверхности Токтогульского водохранилища в условиях изменяющегося гидрологического режима и климатических факторов.

Целью настоящего исследования является анализ изменений площади водной поверхности Токтогульского водохранилища за период 2015–2024 гг. на основе обработки спутниковых снимков Landsat с использованием геоинформационных технологий и спектрального водного индекса NDWI.

МЕТОДЫ И РОЛЬ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ

Геоинформационные системы являются эффективным инструментом для обработки и анализа спутниковых данных. С их использованием возможно вычисление различных параметров земной поверхности в зависимости от поставленных задач. В частности, ГИС-технологии позволяют определять площадь водной поверхности исследуемой территории, анализировать изменения уровня воды, моделировать зоны возможного подтопления и снижения уровня воды, а также оценивать последствия различных режимов эксплуатации

водохранилищ. Таким образом, применение геоинформационных методов расширяет возможности анализа спутниковых изображений и позволяет использовать результаты дистанционного мониторинга при решении практических задач управления водными ресурсами и экологического контроля.

В настоящее время в базе данных нашей исследовательской лаборатории накоплена значительная коллекция спутниковых изображений территории Кыргызской Республики, полученных со спутников серии Landsat за период 2015–2024 гг. Общий объём архива превышает 5 ТБ и продолжает пополняться. В качестве примера на рисунке 1 приведено спутниковое изображение акватории Токтогульского водохранилища за май 2015 года.

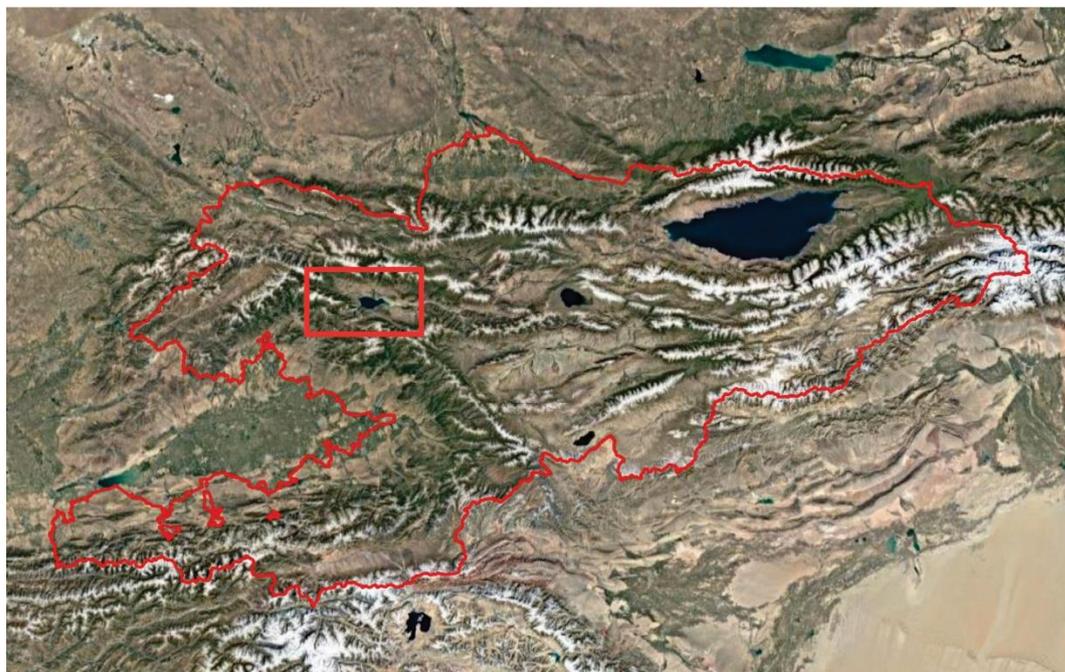


Рисунок 1. Снимок территории Кыргызской Республики со спутника (Landsat -9), где выделен участок Токтогульского водохранилища для исследования.

Объект исследования

Объектом исследования является Токтогульское водохранилище, расположенное на территории Кыргызской Республики. Основным источником его водоснабжения является река Нарын. Истоки реки Нарын находятся в высокогорных районах Тянь-Шаня и формируются за счёт таяния ледников, расположенных на высотах более 3000 м. В верховьях река образуется слиянием рек Малый Нарын и Большой Нарын, питание которых преимущественно связано с таянием ледников. В дальнейшем по мере течения реки её водный сток дополнительно пополняется подземными водами и атмосферными осадками.

Максимальный сток реки Нарын наблюдается в летний период и обусловлен интенсивным таянием ледников. Река протекает по территории Нарынской и Джалал-Абадской областей, её общая протяжённость составляет около 807 км. К числу основных притоков относятся реки Кёкёмерен, Ат-Башы, Алабуга, Он-Арча, Кумбель и Чаек (рисунок 2). В нижнем течении река Нарын, сливаясь с Карадарьёй, образует одну из крупнейших водных артерий Центральной Азии — реку Сырдарью.

Река Нарын играет ключевую роль в функционировании энергетической и ирригационной систем региона Центральной Азии. Гидрологический режим Токтогульского водохранилища оказывает непосредственное влияние на объёмы выработки гидроэлектроэнергии, обеспечение оросительного водоснабжения

анализ изображений выполнялись в программных средах ENVI 5.0 и QGIS (версия 3.36) с целью выделения и картографирования водной поверхности.

Для автоматизированного выделения акватории водохранилища и последующей количественной оценки площади водной поверхности применялся нормализованный разностный водный индекс NDWI (Normalized Difference Water Index), предложенный McFeeters [4]. Данный индекс широко используется при анализе данных дистанционного зондирования для выявления и картографирования водных объектов.

Оценка состояния водных ресурсов является одной из важных задач гидрологических и геоэкологических исследований. Для её решения широко применяются методы спектрального анализа спутниковых данных [5–6]. В настоящем исследовании индекс NDWI использован в качестве основного инструмента для выделения водной поверхности и анализа её изменений по данным спутниковых наблюдений.

Полученные результаты спектрального анализа сопоставлялись с гидрологическими и климатическими данными. Такой подход позволил выявить основные факторы, влияющие на сезонные и межгодовые изменения площади водной поверхности Токтогульского водохранилища. Пример фрагмента спутникового изображения района исследования представлен на рисунке 3.



Рисунок 3. Фрагмент спутникового изображения района Токтогульского водохранилища (Landsat 9, 2015 г.).

Методика исследования включала следующую последовательность этапов:

- анализ исходных данных;
- подбор спутниковых сцен с учётом сезонности и облачности;
- выбор и приведение данных к единой системе координат (WGS-84, проекция UTM; центральные координаты района: $41^{\circ}48'23''$ с.ш., $72^{\circ}52'27''$ в.д.);
- предварительная радиометрическая и геометрическая коррекция;
- расчёт индекса NDWI и выделение контура водной поверхности;
- векторизация границ водохранилища по датам наблюдений;
- расчёт площади акватории и оценка объёмов воды (с использованием цифровой модели рельефа);
- верификация полученных результатов.

Для определения контура водохранилища и анализа его изменений использовались мультиспектральные данные спутника Landsat 9 (таблица 1). Аппарат оснащён сенсорами Operational Land Imager (OLI) и Thermal Infrared Sensor (TIRS). OLI обеспечивает съёмку в девяти спектральных диапазонах с пространственным разрешением 30 м (диапазоны 1–7 и 9) и панхроматическом диапазоне (Band 8) с разрешением 15 м. Диапазон 1 (coastal/ultra-blue) используется для прибрежных и аэрозольных исследований, диапазон 9 — для детектирования перистых облаков.

Тепловые диапазоны 10 и 11 (TIRS) предназначены для регистрации инфракрасного излучения и применяются при построении температурных карт поверхности. Повышенные значения яркостной температуры в этих каналах соответствуют более высоким температурам исследуемых объектов.

Таблица 1 – Диапазоны данных для Landsat 9 [7].

Диапазон	Длина волны (микрометры)	Разрешение (метры)
Band 1 – Прибрежный аэрозоль	0.43-0.45	30
Band 2 – Синий (Blue)	0.45-0.51	30
Band 3 – Зеленый (Green)	0.53-0.59	30
Band 4 – Красный (Red)	0.64-0.67	30
Band 5 – Ближняя инфракрасная (NIR)	0.85-0.88	30
Band 6 – SWIR 1	1.57-1.65	30
Band 7 – SWIR 2	2.11-2.29	30
Band 8 – Панхроматическая	0.50-0.68	15
Band 9 – Cirrus	1.36-1.38	30
Band 10 – Тепловая инфракрасная (TIRS) 1	10.6-11.19	100
Band 11 Тепловое инфракрасное излучение (TIRS) 2	11.50-12.51	100

где:

Blue - цифровое изображение (канал многоспектрального космического снимка), записывающее синий диапазон отражённого света;

Green - цифровое изображение (канал многоспектрального космического снимка), записывающее зелёный диапазон отражённого света;

Red - цифровое изображение (канал многоспектрального космического снимка), записывающее красный диапазон отражённого света;

NIR - цифровое изображение (канал многоспектрального космического снимка), записывающее ближний инфракрасный диапазон отражённого света;

SWIR - цифровое изображение (канал многоспектрального космического снимка), записывающее коротковолновой инфракрасный диапазон отражённого света (от 1.4 – 3 мкм);

SWIR1 - цифровое изображение (канал многоспектрального космического снимка), записывающее первую часть коротковолнового инфракрасного диапазона отражённого света (от 1.55 – 1.75 мкм в системе Landsat 7);

SWIR2 - цифровое изображение (канал многоспектрального космического снимка), записывающее вторую часть коротковолнового инфракрасного диапазона отражённого света (от 2.09 – 2.35 мкм в системе Landsat 7).

Индекс использует спектральные различия водных поверхностей, основанные на их высоком отражении в зелёном канале BL1 (TM2-Blue) и низком — в ближнем инфракрасном (IFL2 -Infred). Для расчёта использовалась стандартная формула (1) по данным спутника

Landsat, что позволило выполнить дистанционное картографирование водной поверхности Токтогульского водохранилища.

Обоснование выбора индекса NDWI для условий горного водохранилища

Для условий Токтогульского водохранилища, расположенного в горной местности с минимальной урбанизированной застройкой в прибрежной зоне, применение классического NDWI представляется более обоснованным по следующим причинам:

1. **Спектральные особенности горных водоёмов.** В условиях высокогорья водная поверхность характеризуется значительным контрастом между отражением в зелёном и ближнем инфракрасном диапазонах, что обеспечивает устойчивые положительные значения NDWI и чёткое отделение воды от скальных и почвенных поверхностей.
2. **Снижение влияния рельефных теней.** В горных районах выраженный микрорельеф и крутые склоны формируют тени, которые в SWIR-диапазоне могут приводить к переоценке водной поверхности при использовании MNDWI. NDWI, основанный на NIR-канале, демонстрирует более стабильные результаты при наличии затенённых участков.
3. **Чувствительность к мутности воды.** Водоохранилища с ледниковым и смешанным типом питания характеризуются сезонной изменчивостью мутности. Индекс NDWI более чувствителен к вариациям отражательной способности в зелёном диапазоне, что позволяет корректно фиксировать границу воды даже при повышенной взвешенности наносов.
4. **Сопоставимость с предыдущими исследованиями.** Большинство гидрологических исследований водных объектов Центральной Азии, выполненных на базе данных Landsat, использовали именно NDWI, что обеспечивает методическую сопоставимость результатов.

Индекс NDWI основан на спектральных особенностях водных поверхностей, характеризующихся относительно высоким коэффициентом отражения в зелёном диапазоне и низким — в ближнем инфракрасном (NIR) диапазоне. Для данных Landsat 9 при расчёте использовались канал 3 (Green, 0.53–0.59 мкм) и канал 5 (Near Infrared, 0.85–0.88 мкм). Расчёт выполнялся по стандартной формуле:

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR} \quad (1)$$

Применение данного индекса позволило выполнить автоматизированное дистанционное картографирование водной поверхности Токтогульского водохранилища и обеспечить сопоставимость результатов по различным датам наблюдений.

В качестве исходных данных использованы спутниковые сцены за 2015–2024 гг., преимущественно полученные в июле месяце. Выбор данного месяца обусловлен минимальной облачностью и стабильной фазой гидрологического режима, что обеспечивает корректность межгодового сопоставления площадей акватории. Для работы применялись растровые изображения, синтезированные стандартным подходом в реальных цветах, поскольку основной целью их использования была векторизация контура водохранилища (рисунк 4).

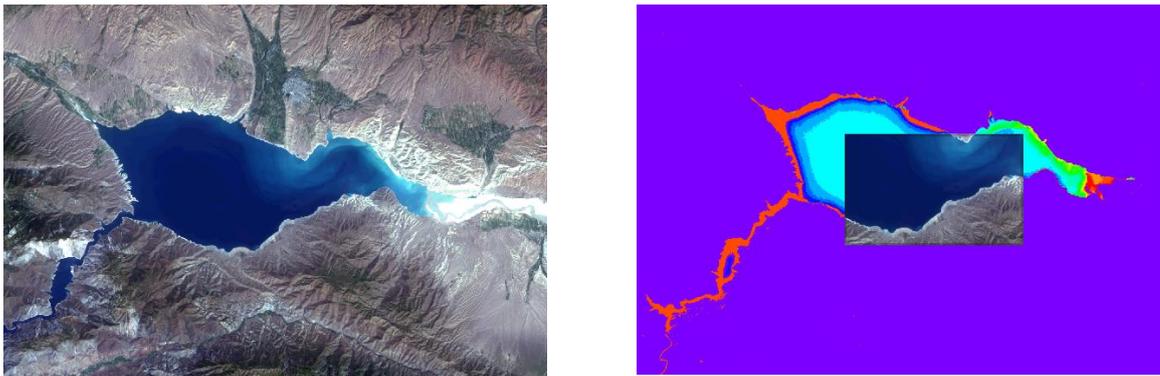


Рисунок 4. Векторизация контура водохранилища.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ СНИМКОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ТОКТОГУЛЬСКОГО ВОДОЁМА С ПОМОЩЬЮ QGIS

Рассмотрим, как данный программный продукт применяется для обработки и анализа спутниковых изображений Токтогульского водохранилища.

Программный комплекс обработки данных дистанционного зондирования

Программный комплекс, разрабатываемый в лаборатории «Информационные технологии» Института сейсмологии НАН КР, соответствует основным требованиям, предъявляемым к современным системам обработки данных дистанционного зондирования Земли.

Модуль загрузки и первичной обработки спутниковых данных обеспечивает унифицированную обработку материалов различных спутниковых платформ. Система автоматически идентифицирует источник данных, параметры съёмки и структуру спектральных каналов на основе анализа служебных метаданных, а также выполняет извлечение пространственных характеристик исследуемой территории.

Дополнительно реализованы инструменты выборки данных из архива по временным интервалам и географическому положению. В качестве примера интерфейса обработки данных на рисунке 5 представлен фрагмент рабочей среды QGIS, использованной при исследовании акватории Токтогульского водохранилища.

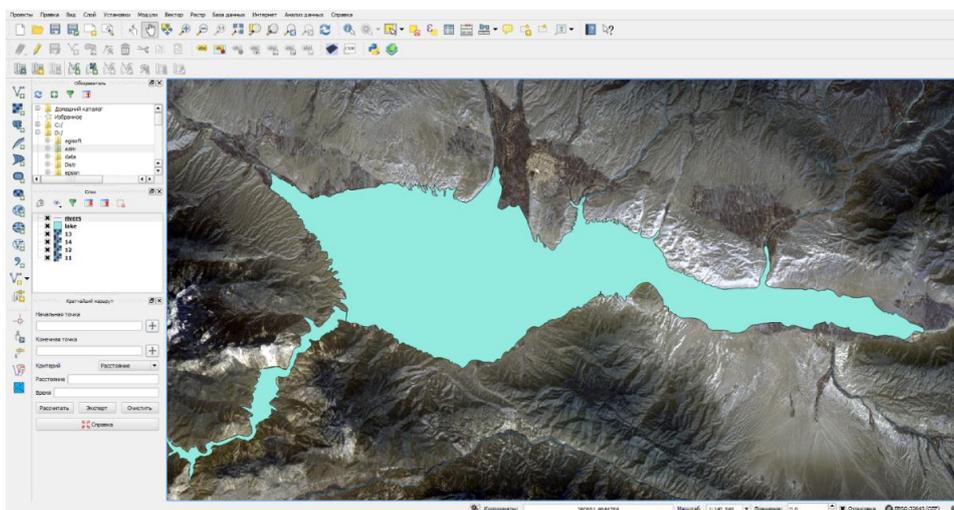


Рисунок 5. Скрин программы QGIS, используемой в исследовании акватории Токтогульского водохранилища.

Получение и подготовка данных

Первый шаг – приобретение спутниковых снимков. Для анализа изменений площади водоёма идеально подходят данные с космического аппарата **Landsat 9**, которые находятся в открытом доступе.

- Загрузка набора снимков за период 2015–2024 гг. (весна/лето — малое облачное покрытие): происходит через встроенные плагины, такие как **QuickMapServices** (для базовых карт), **SCP (Semi-Automatic Classification Plugin)** или **Plugin для поиска USGS Earth Explorer**, которые позволяют напрямую загружать снимки Landsat 9.
- **Атмосферная коррекция:** устранение искажений, вносимых атмосферой.
- **Создание композита:** объединение каналов в единое изображение. Для визуального анализа водных объектов используется комбинация **Short-Wave Infrared (SWIR)**, **Near Infrared (NIR)**, **Green** и **Red** каналов, которая позволяет максимально чётко отделить воду от суши.

Пакет QGIS обладают полным набором инструментов для выполнения этих операций.

1. Выделение акватории водохранилища, т.е. точно определить границы воды и рассчитать её площадь.

- Метод: **Использование вегетационных индексов.** Наиболее эффективным для выделения водных объектов является **нормализованный дифференциальный водный индекс (NDWI)**, который вычисляется по формуле (1). Т.к. вода сильно поглощает излучение в ближнем инфракрасном диапазоне (NIR) и имеет высокую отражательную способность в зеленой части спектра (Green). Поэтому на индексе NDWI водные поверхности ярко выделяются положительными значениями, в то время как суша и растительность – отрицательными.
- **Реализация в QGIS:**
 1. Открываем **Калькулятор растров (Raster Calculator)**.
 2. Вводим формулу, используя номера соответствующих каналов (например, для Landsat 9).
 3. Получаем растр NDWI, где вода имеет значения близкие к 1.
 4. Проводим **пороговую обработку (Thresholding)**, чтобы создать бинарную маску: «вода» и «не вода». Часто используется значение 0.1-0.3.
 5. Инструментом **«Растеризация» (Rasterize)** или **«Полигонизация» (Raster to Vector)** преобразуем полученную маску в векторный контур водохранилища.

Полученный векторный слой представляет собой точную границу водохранилища на момент съёмки. Применяв этот алгоритм к снимкам за разные годы, мы получаем набор контуров с площадью водоёма для анализа динамики. Результаты забора воды в Токтогульском водохранилище показаны на рисунке 6.

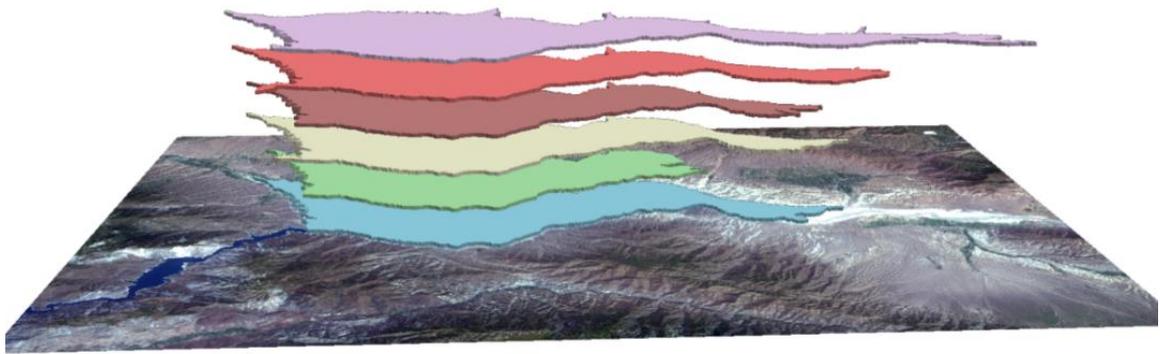


Рисунок 6. Визуализации динамики водной поверхности Токтогульского водохранилища в 2D-проекции с интеграцией в 3D-модель рельефа.

Токтогульское водохранилище

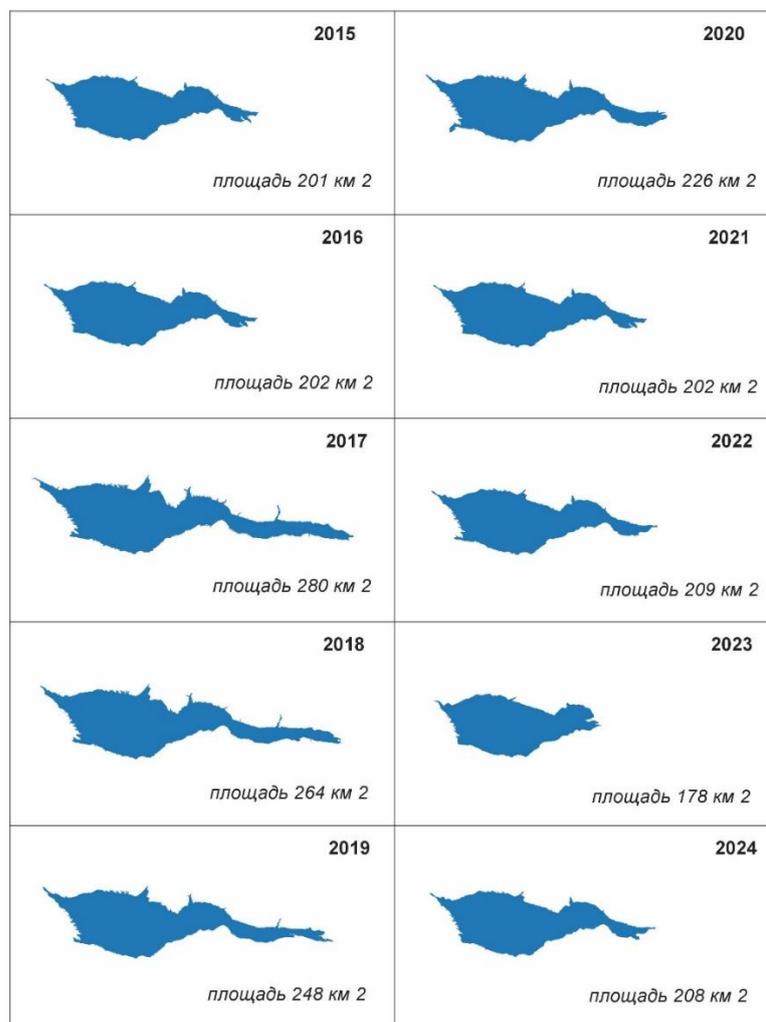


Рисунок 7. Изменения площади Токтогульского водохранилища по годам 2015-2024 годы.

ВЫВОДЫ

В работе проведено исследование изменений площади водной поверхности Токтогульского водохранилища за период 2015–2024 гг. на основе обработки спутниковых снимков Landsat с использованием технологий дистанционного зондирования Земли и геоинформационных систем. Применённый подход позволяет получать количественные характеристики динамики акватории водохранилища непосредственно по данным спутниковых наблюдений и дополняет традиционные гидрологические оценки, основанные на статистических материалах наблюдений.

Разработана и апробирована методика выделения водной поверхности Токтогульского водохранилища на основе спектрального водного индекса NDWI и метода пороговой сегментации спутниковых изображений. В результате обработки сформированы векторные двумерные и трёхмерные модели, отражающие изменения площади водной поверхности за исследуемый период, что позволило проследить межгодовые и сезонные колебания акватории.

Установлено, что изменение площади водохранилища обусловлено совокупностью природных и хозяйственных факторов. Существенное сокращение водной поверхности наблюдается в осенне-зимний период, что связано с повышенным использованием водных ресурсов для выработки электроэнергии, а также с межгодовой изменчивостью атмосферных осадков и климатических условий.

Полученные результаты подтверждают эффективность применения спутниковых данных и геоинформационных методов для мониторинга состояния крупных водохранилищ и могут быть использованы при оценке режимов эксплуатации и управлении водными ресурсами Токтогульского водохранилища.

ЛИТЕРАТУРА

1. Панасюк М., Сафиоллин Ф., Логинов Н., Пудовик Е. Картография, фотограмметрия и дистанционное зондирование Земли// - Казань : Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2018.
2. Kумму М., de Моел Н., Ward P., Varis O. How Close Do We Live to Water? A Global Analysis of Population Distance to Freshwater Bodies// PLoS One. - 2011. - 6: Vol. 6.
3. К.К.Талыпов, К.М.Жумалиев. Принципы формирования, обработки и распространения данных дистанционного зондирования земли и геоинформационная система «Цифровой Кыргызстан»// Научный журнал “Физика”, 2016, № 1. - с.119-127.
4. McFEETERS S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features// Int. jour. Remote sensing, 1996, VOL. 17, No.7, 1425-1432
5. Work, E., Gilmer, D. Utilization of satellite data for inventorying prairie ponds and lakes// Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1976, v. 42, p. 685-694.
6. Lathrop, R. G., & Lillesand, T. M. Use of Thematic Mapper data to assess water quality in Green Bay and central Lake Michigan// *Photogrammetric engineering & remote sensing*, 1986, 52(5), 671-680.
7. USGS EROS Archive - Landsat Archives - Landsat 8-9 OLI/TIRS Collection 2 Level-2 Science Products | U.S. Geological Survey [Электронный ресурс] URL: <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-landsatarchives-landsat-8-9-oliltirs-collection-2-level-2>.
8. Токтогульское водохранилище // [Словарь названий гидрографических объектов России и других стран — членов СНГ](#) / под ред. Г. И. Донидзе. — М.: Картгеоцентр — Геодезиздат, 1999. — С. 376.

Рецензент: профессор, д. ф.-м. н. Исманов Ю.Х.

(кафедра «Физика» КГТУ им. И. Раззакова)