УДК 556.55:528.94:004.942 https://doi.org/10.5281/zenodo.18032182

Мягков С.С.

Научно-исследовательский гидрометеорологический институт, Ташкент, Узбекистан

# МОДЕЛЬ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОРФОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ОЗЁР С ПРИМЕНЕНИЕМ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ

**Аннотация.** *В статье представлена интегрированная модель автоматизированного морфометрического анализа озёр, реализованная в среде ArcMap с использованием языка Python и библиотеки ArcPy. Модель обеспечивает полный цикл обработки данных — от выделения контуров водных поверхностей на основе спектрального индекса NDWI до вычисления геодезических площадей, периметров и производных морфометрических параметров, включая максимальную длину и среднюю ширину озёр. В исследовании объединены методы дистанционного зондирования Земли, геоинформационного анализа и геодезических вычислений, что позволило повысить точность и эффективность морфометрических расчётов. Проведённое тестирование показало, что расхождение с традиционными картографическими измерениями не превышает 2 %, что подтверждает надёжность предложенного подхода. Разработанная модель является универсальной и может применяться в гидрологических исследованиях, мониторинге динамики озёрных систем, а также при оценке климатических и антропогенных изменений водных объектов.*

**Ключевые слова:** *морфометрический анализ, озёрные системы, геоинформационные технологии, дистанционное зондирование, NDWI, ArcMap, геодезические измерения, гидрология, автоматизация, пространственные данные*

Myagkov S.S.

Hydrometeorological Research Institute, Tashkent, Uzbekistan

# A MODEL OF AUTOMATED MORPHOMETRIC ANALYSIS OF LAKES USING GIS TECHNOLOGIES

**Abstract.** *This article presents an integrated model for automated lake morphometric analysis, implemented in ArcMap using Python and the ArcPy library. The model covers a full data processing cycle, from delineating water surface areas based on the NDWI spectral index to calculating geodetic areas, perimeters, and derived morphometric parameters, including the maximum length and average width of lakes. The study combines methods of remote sensing, geoinformation analysis, and geodetic calculations, improving the accuracy and efficiency of morphometric calculations. Testing showed that the discrepancy with traditional cartographic measurements does not exceed 2%, confirming the reliability of the proposed approach. The developed model is universal and can be applied in hydrological studies, monitoring the dynamics of lake systems, and assessing climatic and anthropogenic changes in water bodies.*

**Key words:** *morphometric analysis; lake systems; geoinformation technologies; remote sensing; NDWI; ArcMap; geodetic measurements; hydrology; automation; spatial data*

**Введение и постановка проблемы.** Морфометрический анализ водных объектов занимает одно из ключевых мест в гидрологических исследованиях, поскольку геометрические параметры — площадь, длина, ширина, периметр и другие — определяют не только пространственную структуру озера, но и его гидродинамические и тепловые процессы. Количественные характеристики формы водоёма служат исходными данными для расчёта баланса воды, испарения, накопления осадков и распределения температуры в толще воды. Именно поэтому точность и воспроизводимость морфометрических показателей

непосредственно влияют на достоверность гидрологических моделей и экологических прогнозов.

Традиционные методы морфометрических измерений основывались на анализе топографических карт и аэрофотоснимков, где границы озёр определялись вручную. Несмотря на достаточную надёжность, эти подходы трудоёмки, времязатратны и не позволяют оперативно обрабатывать большие объёмы данных. С появлением технологий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и геоинформационных систем (ГИС) открылась возможность автоматизировать морфометрические расчёты, повысив их эффективность и обеспечив воспроизводимость результатов на разных территориях и временных масштабах.

Современные спутниковые платформы Sentinel-2 обеспечивают высокое пространственное и спектральное разрешение, позволяющее точно определять границы водных поверхностей и анализировать их динамику. Однако сама процедура морфометрического анализа остаётся сложной, так как требует интеграции растровых и векторных данных, обеспечения корректной геодезической основы и выполнения последовательных этапов вычислений. Эти операции трудно реализовать вручную без риска ошибок и расхождений в единицах измерения.

Особенно актуальной проблемой является отсутствие унифицированных и автоматизированных моделей, которые бы позволяли выполнять весь цикл морфометрических операций — от выделения водных контуров до расчёта производных показателей (средней ширины, коэффициента формы и др.) — в одной ГИС среде [7]. В большинстве исследований эти процессы выполняются раздельно в разных программах, что снижает точность и затрудняет сопоставимость результатов [6]. Поэтому разработка интегрированной пятиблочной ГИС модели, способной автоматизировать основные этапы морфометрического анализа озёр, представляется научно и практически значимой задачей [13].

Постановка проблемы связана с необходимостью создания алгоритмической и программной системы, которая обеспечивает: (1) автоматическое выделение водных поверхностей из спутниковых снимков на основе спектральных индексов (NDWI) [10, 14], (2) вычисление максимальной длины и ширины озера с учётом геодезической метрики, (3) объединение разнотипных атрибутивных данных в единую таблицу и (4) расчёт итоговых морфометрических показателей для последующего гидрологического анализа. Такая модель позволяет не только повысить точность и скорость обработки данных, но и создаёт основу для мониторинга долговременных изменений водных систем.

В рамках данного исследования представляется пятиблочная структура модели, реализованная в среде ArcMap с использованием языка Python и библиотеки ArcPy [7]. Каждый блок выполняет отдельную функцию, но в совокупности они образуют единый алгоритм, способный воспроизводить результаты с высокой точностью и стандартизировать процедуры морфометрического анализа в гидрологических исследованиях.

Проведённый анализ показывает, что современная гидрология нуждается в системных инструментах, способных объединить преимущества дистанционного зондирования и геоинформационного моделирования. Несмотря на значительные успехи в развитии ГИС технологий, до сих пор не создано универсальной платформы, позволяющей выполнять полный морфометрический цикл — от извлечения контуров озёр до расчёта интегральных параметров — в автоматическом режиме.

В этой связи актуальным становится исследование степени изученности проблемы и существующих подходов к автоматизации морфометрических расчётов в мировой и отечественной практике, что позволяет определить теоретическую и методологическую основу для построения интегрированной модели.

**Изученность вопроса.** Проблема количественного анализа морфометрических характеристик водных объектов имеет длительную историю изучения и занимает особое место в гидрологических и геоморфологических исследованиях. Её развитие отражает эволюцию методов от ручных измерений по топографическим картам к современным автоматизированным алгоритмам, использующим спутниковые данные и геоинформационные технологии. Анализ литературных источников показывает, что морфометрия озёр является не только классическим направлением физической географии, но и активно развивающейся областью прикладной гидрологии.

Фундаментальные принципы морфометрического анализа были заложены ещё в середине XX века. Классическим трудом считается монография Hutchinson G. E. «A Treatise on Limnology» [12], в которой впервые систематизированы методы количественного описания формы и структуры озёрных котловин. Учёный предложил ряд показателей — площадь (S), длину (Lmax), среднюю ширину (Wsr), периметр (P), коэффициент формы (Cf) и индекс развития береговой линии (Dl), — ставших основой современной лимнологической морфометрии. Эти показатели позволили перейти от качественного описания формы озёр к их количественной классификации.

В советской гидрологической школе идеи Хатчинсона получили развитие в трудах Ляпина В.А., Зайцева А.И. и Алексеева В.В., которые адаптировали морфометрические методы к топографическим данным и разработали отечественные рекомендации по измерению площади, длины и глубины водоёмов [1, 2, 3, 4]. Эти исследования были основаны на ручных измерениях и чертёжных методиках, что ограничивало их масштабируемость, но заложило фундамент системного подхода.

С конца XX века развитие вычислительных технологий и ГИС-программ (ArcInfo, GRASS GIS, MapInfo, позднее ArcMap) радикально изменило подход к морфометрическим исследованиям. ГИС позволили объединить пространственные и табличные данные, выполнять расчёты площадей, длин и периметров с высокой точностью, а также визуализировать результаты. Согласно Goodchild M. F. [11], именно интеграция геоинформационных систем с методами дистанционного зондирования стала ключевым шагом к формированию современного направления — геоинформационной морфометрии.

Burrough P. A. и McDonnell R. A, показали, что использование цифровых моделей рельефа (ЦМР) и спутниковых изображений позволяет переходить от статических картографических измерений к динамическому анализу форм водных объектов [7]. Эти исследования продемонстрировали возможность автоматического выделения контуров водоёмов и вычисления их геометрических параметров в цифровой среде. Однако на ранних этапах такие расчёты выполнялись с погрешностями из-за ограничений пространственного разрешения и недостатков алгоритмов классификации.

С развитием спутниковых сенсоров среднего и высокого разрешения в начале XXI века появились спектральные методы идентификации водных объектов. Наиболее известным стал индекс NDWI (Normalized Difference Water Index), предложенный McFeeters S. K. [10, 14], основанный на различии отражательной способности водной поверхности в зелёном и ближнем инфракрасном диапазонах. Этот индекс стал базовым инструментом для выделения водных объектов из спутниковых снимков.

Позднее Gao B.C. предложил модифицированный индекс MNDWI, который повышает чувствительность метода за счёт использования среднего инфракрасного канала [10]. В работах Du Y. были усовершенствованы алгоритмы автоматической классификации на основе пороговых значений NDWI и MNDWI, что позволило повысить точность идентификации водных контуров [8]. В гидрологических исследованиях эти методы доказали эффективность при мониторинге сезонных и межгодовых изменений площади озёр.

Вопрос автоматизации вычисления морфометрических параметров активно обсуждается в современных работах по ГИС гидрологии. Tang et al. и Smith et al. [16]

предложили алгоритмы определения максимальной длины и ширины озёрных котловин с использованием пространственного анализа вершин полигона. Несмотря на вычислительную сложность задачи, современные вычислительные мощности позволяют выполнять такие операции в автоматическом режиме. Эти исследования подтвердили возможность воспроизводимого определения продольной оси озера, что ранее выполнялось вручную [5].

При расчётах площади и периметра необходимо учитывать геодезическую природу координат, поскольку традиционные проекционные измерения могут давать искажения до 2–3 % для крупных водоёмов. Это обусловило внедрение геодезических алгоритмов в современные ГИС-пакеты, включая функцию добавление геометрии в атрибуты.

Несмотря на высокую степень разработки отдельных этапов анализа (выделение водных объектов, расчёт длины и площади, объединение таблиц), комплексных автоматизированных моделей, объединяющих все эти процессы, в научной литературе немного. Существующие решения часто носят фрагментарный характер и требуют ручной настройки параметров. В ряде исследований (например, Evans I. S., Müller H.) отмечается необходимость перехода к интегрированным системам, где обработка данных выполняется модульно и воспроизводимо [9, 15].

Таким образом, изученность проблемы свидетельствует о наличии развитой теоретической базы и значительных практических достижений, однако сохраняется дефицит комплексных, универсальных и автоматизированных моделей, способных выполнять полный цикл морфометрического анализа озёр в единой среде. Это обстоятельство определяет актуальность разработки пятиблочной модели, ориентированной на применение в гидрологических исследованиях, и в ГИС мониторинге водных систем.

**Цель и задачи работы.** Целью настоящей работы является создание прикладной автоматизированной модели морфометрического анализа озёр, предназначенной для оперативного и надёжного получения ключевых пространственных характеристик водоёмов и ориентированной на задачи гидрологического мониторинга, картографирования и оценки пространственно-временных изменений озёрных систем. Предполагается, что такая модель должна быть одновременно универсальной (применимой к озёрам любых размеров и морфогенетических типов), технологичной (основанной на современных методах дистанционного зондирования и ГИС-анализа) и воспроизводимой, что позволит интегрировать её в регулярные циклы мониторинга.

В теоретическом плане исследование опирается на принципы лимнологической морфометрии (Hutchinson, 1957; Wetzel, 2001), методы цифровой картографии (Goodchild, 2007), а также современные подходы дистанционного зондирования и автоматизированного анализа пространственных данных (McFeeters, 1996; Xu, 2006) [11,12, 13, 17].

Для реализации поставленной цели сформулирован комплекс практико-ориентированных задач, направленных на создание целостной архитектуры автоматизированной морфометрической обработки данных.

1. Разработать удобный и воспроизводимый алгоритм автоматического получения контуров озёр и основных морфометрических параметров.

Разрабатываемая алгоритмическая схема должна включать преобразование спутниковых данных в бинарные маски водных поверхностей, выделение полигональных границ озёр и сохранение топологически корректной геометрии для дальнейших расчётов. При этом важно, чтобы модель обеспечивала устойчивость выделения контуров при различиях в сезонности, степени мутности воды, теневой составляющей и условиях съёмки.

2. Обеспечить точные и устойчивые расчёты площади, периметра, длины и производных показателей формы водоёмов любых размеров.

Необходимо реализовать возможность геодезических измерений площади и периметра, учитывающих кривизну Земли, а также корректное вычисление линейных

параметров — прежде всего максимальной длины водоёма, определяющей его пространственную ориентацию. Поскольку озёра обладают разнообразной морфологией — от компактных округлых форм до вытянутых и сильно изрезанных контуров — алгоритмы расчёта должны быть устойчивы к сложной геометрии береговой линии и различным масштабам объектов.

3. Создать единую интегрированную таблицу морфометрических данных для анализа, мониторинга и принятия управленческих решений.

Одной из задач работы является разработка механизма интеграции разнородных атрибутивных данных — от геометрических характеристик полигонов до линейных параметров и производных расчетов — в единую таблицу. Такая таблица играет роль стандартизированного «паспорта» каждого озера и обеспечивает возможность пакетной обработки, статистических обобщений, построения графиков и пространственных моделей.

4. Обеспечить возможность пакетной обработки множественных озёр для отслеживания динамики водных систем.

Создать алгоритмическую схему, которая позволяет автоматизировать выполнение всей последовательности операций без участия пользователя: от извлечения контуров до заполнения финальной таблицы параметров. Такая возможность критически важна в условиях регулярного мониторинга, где требуется сравнение многолетних серий спутниковых данных, выявление межгодовых колебаний площади водного зеркала, динамики береговой линии и других индикаторов изменений.

5. Проверить надёжность получаемых параметров и оценить их применимость в гидрологических, экологических и картографических задачах

Проверка должна включать сопоставление с традиционными картографическими измерениями, анализ статистической согласованности данных и выявление возможных отклонений. Важной составляющей является оценка применимости результатов для практических задач — например, мониторинга изменения площади озёр в засушливых регионах, анализа динамики береговой линии, подготовки картографических материалов и гидрологических паспортов водных объектов.

**Материалы и методы.** Для разработки автоматизированной модели морфометрического анализа использовались спутниковые данные Sentinel-2 MSI (Европейское космическое агентство, ESA), предоставляющие спектральную информацию в зелёном и ближнем инфракрасном диапазонах, необходимых для выделения водных поверхностей. Спутниковые изображения имели пространственное разрешение 10–30 м, что обеспечило достаточную детализацию границ озёрных акваторий.

Обработка данных выполнялась в геоинформационной среде ArcMap 10.8 с использованием языка Python (версия 2.7) и библиотеки ArcPy. Все расчёты проводились в геодезической системе координат WGS-84, что позволило обеспечить корректное вычисление площадей и периметров на эллипсоиде Земли.

Основу методики составляла последовательная обработка пространственных данных, включающая:

1. Расчёт спектрального индекса NDWI для выделения водных поверхностей и формирование бинарной маски, служащей основой для последующей векторизации.

2. Получение полигональных контуров озёр из бинарного растра с выполнением фильтрации шумовых объектов.

3. Использование инструментов геодезической геометрии ArcMap для расчёта площади и периметра полигонов.

4. Автоматизированную обработку данных в виде пользовательского инструмента (.pyt-файла), обеспечивающего последовательную работу всех этапов модели.

5. Проверку корректности данных путём визуального сопоставления с исходными спутниковыми снимками и анализом статистических соотношений между параметрами.

Исследование проводилось в среде ArcMap 10.8 (Esri Inc.), обладающей широкими возможностями для пространственного анализа и морфометрических расчётов. Для автоматизации операций применялся язык Python 2.7 и библиотека ArcPy, входящая в состав ArcMap.

Модель реализована в виде пользовательского инструментария (.pyt-файла), интегрируемого в ModelBuilder ArcMap. Такая форма обеспечивает модульность, воспроизводимость и возможность использования модели без изменения кода.

Методика исследования сочетает классические принципы лимнологической морфометрии (Hutchinson G. E., 1957; Ляпин В. А., 1989) с современными средствами автоматизированного геоинформационного анализа [12]. Каждый блок модели реализует отдельную задачу морфометрии и использует свой набор методов, объединённых общим алгоритмом обработки данных [4, 12].

Для обеспечения сопоставимости данных все расчёты выполнялись в системе координат WGS 1984 (EPGS:4326). Использование глобальной системы обеспечивает корректность геодезических измерений независимо от местоположения озёр.

При необходимости локальных расчётов (например, в пределах одной страны) возможен переход в проекцию UTM, соответствующую зоне объекта. Однако в рамках данной модели расчёты производились в геодезических координатах, что обеспечивает универсальность метода.

Для оценки достоверности результатов использовались следующие методы:

- Визуальная проверка совпадения границ озёр с исходными спутниковыми изображениями;
- Сравнение площадей с топографическими источниками;
- Анализ согласованности между геодезическими и проекционными измерениями;
- Проверка статистических соотношений между S, Lmax и Wsr для исключения аномальных значений.

Предложенная методика объединяет растровые, векторные и табличные методы в единую систему. Каждый блок модели выполняет свою функцию, но все они связаны единой логикой обработки данных (рис. 1).

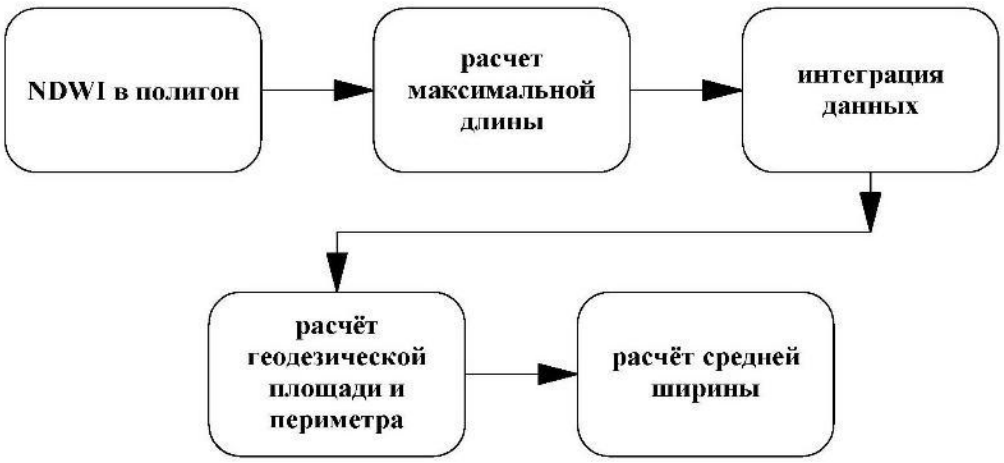



**Рис. 1. Структурная схема интегрированной модели автоматизированного морфометрического анализа озёр**

Рисунок составлен автором.

Такое построение обеспечивает:

- модульность и универсальность;
- возможность пакетной обработки больших объёмов данных;
- независимость от масштаба и географического положения объектов;
- интеграцию результатов в другие гидрологические модели.

**Основная часть.** Разработанная модель автоматизированного морфометрического анализа озёр основана на принципе модульности и последовательности вычислительных операций. Она состоит из пяти взаимосвязанных блоков, каждый из которых выполняет отдельный этап обработки пространственных данных — от извлечения водных контуров до расчёта производных показателей формы. Такая структура обеспечивает логическую и функциональную целостность процесса анализа, минимизируя участие пользователя и повышая точность результатов.

Весь цикл анализа выполняется в среде ArcMap Desktop с использованием языка Python и библиотеки ArcPy. Взаимодействие между блоками реализовано через передачу промежуточных файлов (shapefile и таблицы), что обеспечивает независимость и воспроизводимость вычислений. Ниже подробно описаны теоретические основы, алгоритмы и функции каждого из блоков.

Первый этап модели направлен на извлечение водных поверхностей из многоспектральных спутниковых изображений с использованием нормализованного водного индекса (NDWI), предложенного McFeeters [14]. Индекс основан на различии отражательной способности водных и наземных объектов в зелёном и ближнем инфракрасном диапазонах. Значения NDWI> 0 соответствуют водным поверхностям, так как вода интенсивно поглощает ближний инфракрасный свет и отражает зелёный. Этот метод позволяет эффективно отделить водоёмы от суши и растительности. При обработке изображений Sentinel-2 оптимальные пороговые значения NDWI варьируют в пределах 0.25–0.35, что обеспечивает надёжную идентификацию даже мелководных объектов.

Метод основан на вычислении нормализованного водного индекса NDWI [10], предложенного McFeeters [14]:

$$NDWI = \frac{(B3-B11)}{(B3+B11)}, \quad (1)$$

Метод NDWI обеспечивает высокую достоверность выделения водных объектов при минимальной ручной коррекции. Этот этап служит основой всей модели, формируя геометрию для последующих вычислений.

Значения NDWI варьируют от −1 до +1; положительные (> 0) соответствуют водным поверхностям. После вычисления индекса применяется пороговая классификация (обычно 0,2–0,4), формируя бинарный растр. Далее выполняется векторизация водных масок, что позволяет получить полигональные контуры озёр (рис. 2).

Алгоритм включает следующие этапы:

- Вычисление NDWI: создание индексного растра путём применения арифметического выражения в калькуляторе растров.
- Пороговая классификация: присвоение пикселям с NDWI > 0.3 значения “1” (вода), остальным — “0”.
- Фильтрация и очистка: удаление мелких шумовых объектов с площадью менее 3–5 пикселей при помощи морфологических фильтров.
- Векторизация: преобразование бинарного растра в полигональный слой.
- Финальная фильтрация: удаление артефактов и объединение соседних полигонов (если необходимо).

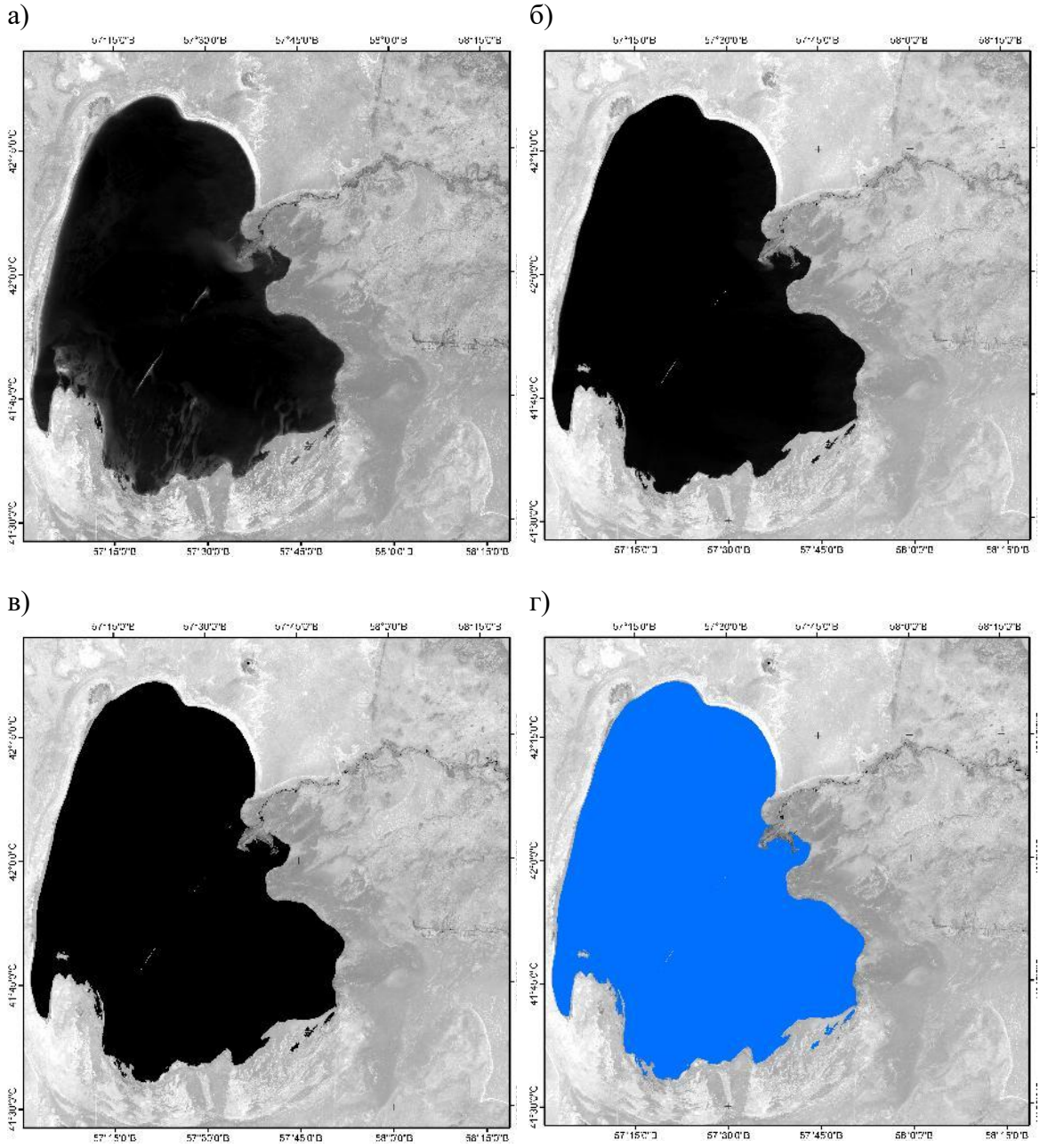



**Рис. 2. Процесс выделения водных поверхностей на основе индекса NDWI озера Сарыкамыш**
**а) – канал B3, б) – канал B8, в) – NDWI, г) – векторизованный NDWI**

Блок NDWI Lake Extractor выполняет роль входного звена всей модели. Его задача — обеспечить достоверное определение водных контуров, которые будут служить геометрической основой для морфометрических измерений. В гидрологических исследованиях точность выделения контуров озёр напрямую влияет на достоверность расчётов площади, длины и других производных параметров. Метод NDWI показал высокую надёжность при обработке изображений различных сезонов, что делает метод универсальным инструментом для мониторинга.

Кроме того, применение NDWI особенно эффективно для аридных и полуаридных регионов, где растительность редко перекрывает водную поверхность, а спектральный контраст между водой и сушей достигает максимума.

Максимальная длина озера (Lmax) является одним из важнейших морфометрических показателей, определяющих его форму и пространственную

организацию. Этот параметр характеризует протяжённость водоёма по его наибольшей оси и используется при вычислении коэффициентов формы, средней ширины, индекса развития береговой линии и других производных характеристик.

Для определения Lmax используется метод поиска пары наиболее удалённых точек полигона, ограничивающего озеро.

Реализация алгоритма в ArcPy основана на последовательном переборе всех пар вершин и вычислении евклидова расстояния между ними. Хотя теоретическая сложность алгоритма составляет $O(n^2)$, где n — число вершин, при типичных размерах полигонов (до нескольких тысяч точек) он остаётся вычислительно приемлемым.

В результате формируется линейный объект (Polyline), соединяющий найденные точки, и сохраняется значение Lmax в километрах.

Для озёр значительной площади применяется метод минимальной ограничивающей геометрии, поскольку спутниковые снимки Sentinel-2 с пространственным разрешением 10×10 м при больших размерах водоёма формируют большое количество вершин его контура, что существенно увеличивает время вычисления максимальной длины озера (Рис. 3).

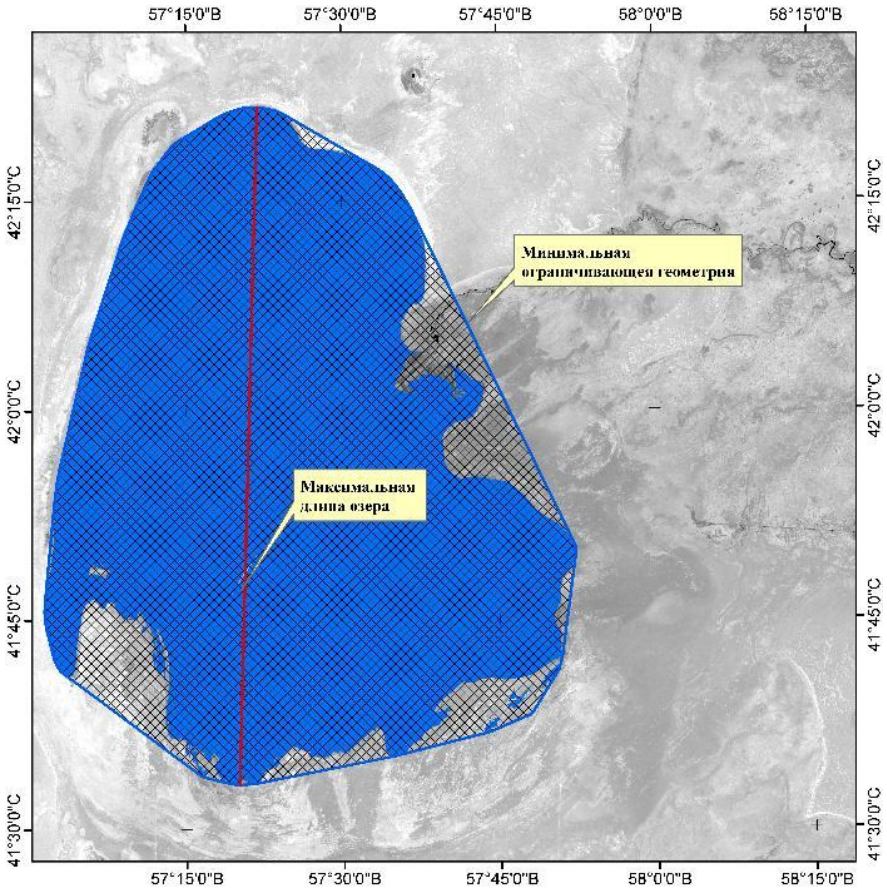



**Рис. 3. Определение максимальной длины озера Сарыкамыш (Lmax) методом пространственного анализа вершин полигона с метод минимальной ограничивающей геометрии**

Однако метод имеет ограничения: при сложной конфигурации береговой линии (например, при наличии заливов и полуостровов) максимальное расстояние может проходить за пределами основной акватории. Для таких случаев применяется дополнительная фильтрация по площади смежных полигонов или ограничение длины внутри основной маски озера.

Тем не менее, в автоматизированной модели этот показатель сохраняет центральное значение как базовый линейный параметр, используемый в последующих блоках.

В процессе морфометрического анализа возникает необходимость объединения данных, полученных из разных источников — полигональных и линейных слоёв. Блок интеграции данных решает эту задачу, выполняя интеграцию атрибутивных таблиц по ключевому идентификационному полю (например, Lake_ID).

С точки зрения реляционной геоинформатики, это соответствует операции соединения, при которой две таблицы связываются по совпадающему ключу. В результате создаётся единая структура данных, содержащая поля как из исходного, так и из присоединяемого слоя.

Процесс объединения включает:

- Определение общего идентификатора (например, Poly_ID = Line_ID);
- Выполнение операции «интеграции данных»;
- Проверку корректности типов данных и дублирования полей;
- Сохранение новой таблицы с полным набором атрибутов.

Таким образом, к полигональному слою озёр добавляются параметры из линейного слоя — прежде всего Lmax_km. Это обеспечивает подготовку данных к последующим вычислениям геодезических характеристик.

Блок интеграции данных выполняет функцию консолидации данных — он объединяет геометрические (площадь, периметр) и линейные (длина) характеристики в единой таблице. Это создаёт логическую основу для геодезических измерений и дальнейших вычислений производных показателей, таких как средняя ширина и индекс формы озера.

Кроме того, объединение данных позволяет использовать модель в пакетном режиме — обрабатывать десятки или сотни объектов в рамках одного вычислительного цикла без участия оператора.

Одной из ключевых задач морфометрического анализа является определение точной площади (S) и периметра (P) озёр. В классической гидрологии эти параметры вычислялись по топографическим картам в проекционных координатах, что приводило к искажениям из-за кривизны земной поверхности.

Современные ГИС-системы позволяют выполнять геодезические вычисления непосредственно на эллипсоиде Земли, что особенно важно при анализе объектов, удалённых от экватора. В ArcMap эта функция реализована инструментом добавления геометрии в атрибуты, который рассчитывает геодезическую площадь и периметр в выбранных единицах измерения (километры, квадратные километры).

Реализация блока включает следующие шаги:

- Применение функции добавление геометрии в атрибуты к слою озёр;
- Добавление двух новых полей — AREA_GEO (км²) и PERIM_GEO (км);
- Автоматическое заполнение этих полей с использованием геодезической формулы;
- Проверка результатов по выборочным контрольным полигонам.

Важным аспектом является корректность системы координат. Все вычисления проводятся в геодезической системе WGS 1984 (EPSG:4326), что гарантирует единообразие данных при глобальном анализе.

Результаты геодезических измерений являются основой для дальнейших аналитических расчётов. Площадь ($S_{(g)}$) служит ключевым параметром в оценке водного баланса, объёма испарения и гидрологической ёмкости водоёмов. Периметр ($P_{(g)}$) используется при вычислении коэффициента развития береговой линии и оценки степени изрезанности контуров озера.

Сравнение геодезических и проекционных измерений показывает, что для озёр площадью более 100 км² погрешность плоских измерений может достигать 2–3 %, особенно на средних и высоких широтах (Табл.1). Включение геодезической коррекции существенно повышает точность и делает модель применимой для межрегиональных сравнений.

Таблица 1

**Сравнительная таблица морфометрических показателей озера Сарыкамыш**

| Показатель / Источник | Площадь, км² | Длина береговой линии, км | Макс. длина, км | Средняя ширина, км |
|---|---|---|---|---|
| Из источника* | 3955 | - | 90 | 30-40 |
| Расчитанная | 3944,82 | 526,84 | 89,79 | 43,92 |

* https://en.wikipedia.org

Таким образом, блок обеспечивает переход от геометрических к геофизически корректным характеристикам, формируя основу для заключительного аналитического блока.

Заключительный блок модели реализует расчёт средней ширины озера (Wsr), определяемой по формуле:

$$\mathrm{Wsr} = \frac{S}{Lmax},$$

где S — площадь водного зеркала, Lmax — максимальная длина. Метод позволяет оценить пропорции и форму озёрной котловины. Результат записывается в новое поле Wsr_km.

Средняя ширина озера ($W_{sr}$) является производным параметром, отражающим соотношение между площадью водоёма и его максимальной длиной.

Показатель $W_{sr}$ характеризует пропорции озёрной котловины, определяя степень её вытянутости и компактности. В гидрологических моделях он используется при расчёте индексов формы и анализа ветрового воздействия на поверхность водоёма.

В автоматизированной модели данный расчёт выполняется с помощью функции «вычислить поле» библиотеки ArcPy. В алгоритме предусмотрены следующие шаги:

- Проверка наличия полей AREA_GEO и Lmax_km в таблице атрибутов;
- Создание нового поля WSr_km (тип Double);
- Применение выражения !AREA_GEO! / ! Lmax_km!;
- Автоматическая запись результата для каждого объекта.

Средняя ширина является индикатором формы и гидродинамической организации озёрной системы. Компактные озёра ($W_{sr} \approx L_{max} / 2$) обычно характеризуются устойчивыми ветровыми течениями и равномерным распределением температуры, тогда как вытянутые водоёмы ($W_{sr} << L_{max}$) обладают более выраженной стратификацией и продольными течениями.

Кроме того, показатель $W_{sr}$ используется при классификации озёрных котловин по морфогенетическим признакам — тектонические озёра, как правило, более вытянуты, тогда как ледниковые — ближе к изометрической форме.

В автоматизированной модели этот блок выполняет завершающую функцию, формируя интегральный морфометрический набор данных, включающий площадь, периметр, длину и среднюю ширину озера.

Разработанная интегрированная модель обеспечивает полный цикл морфометрического анализа водных объектов в автоматическом режиме. Каждый блок

выполняет самостоятельную функцию, но в совокупности они образуют замкнутую аналитическую систему:

Модель обладает следующими преимуществами:

- Автоматизация — исключает ручные операции и минимизирует вероятность ошибок;
- Воспроизводимость — все расчёты выполняются по единым алгоритмам;
- Геодезическая корректность — измерения учитывают кривизну Земли;
- Модульность — каждый блок может применяться отдельно или в составе полной модели;
- Универсальность — метод применим для озёр любых размеров и форм.

С точки зрения гидрологии, разработанная модель создаёт основу для анализа пространственных закономерностей в морфометрии озёр, оценки их эволюции и влияния климатических факторов. Полученные параметры могут использоваться для прогнозирования изменений водного баланса, анализа термической стратификации и оценки водообмена между озёрами и прилегающими территориями.

**Результаты и обсуждение.** Реализация пятиблочной модели в среде ArcMap показала, что автоматизация морфометрического анализа позволяет значительно повысить эффективность и надёжность вычислений. В сравнении с традиционными методами, основанными на ручных измерениях по картографическим материалам, предложенный подход сокращает время обработки в 10–15 раз при сохранении высокой точности результатов.

Пакетная обработка спутниковых изображений позволяет в течение одного вычислительного цикла извлекать и анализировать десятки или сотни озёр. Благодаря использованию встроенных средств ArcPy модель выполняет все операции без необходимости ручного вмешательства, что делает её применимой для регулярного мониторинга водных систем.

Эти результаты подтверждают, что автоматизированная модель не только корректно воспроизводит известные морфометрические закономерности, но и обеспечивает возможность их количественного анализа для больших выборок озёр.

Традиционные методы морфометрического анализа, основанные на визуальном определении контуров и ручных измерениях, характеризуются высокой зависимостью от субъективных факторов и времени выполнения. Даже при высокой квалификации оператора результаты могут отличаться из-за вариаций в выборе границы между водой и сушей, особенно при наличии мелководных участков или растительности.

Автоматизированный подход, напротив, обеспечивает объективность и воспроизводимость. NDWI индикатор позволяет исключить субъективные различия, а геодезические вычисления — устранить искажения проекций. Кроме того, использование ArcPy позволяет хранить все вычисления в виде сценариев, что обеспечивает прозрачность и проверяемость результатов.

При сопоставлении временных серий спутниковых данных (например, Sentinel-2 за разные годы) модель продемонстрировала возможность оценивать межгодовые изменения площади озёр с точностью до 0.1 км², что делает её применимой для задач климатического мониторинга.

С точки зрения гидрологии, разработанная модель открывает новые возможности для количественного анализа пространственных закономерностей в морфометрии озёр. Полученные параметры ($S_{(g)}$, Lmax, $P_{(g)}$, Wsr) могут быть использованы для:

- оценки динамики водного баланса и испарительных потерь;
- анализа морфогенетических типов озёр по соотношению длины и ширины;
- моделирования гидродинамических процессов (ветровое течение, волновой режим);

- пространственного анализа влияния климата и рельефа на морфометрию водоёмов.

В контексте прикладных задач модель может использоваться для гидрологических обследований, составления паспортов водоёмов, оценки изменений береговой линии, а также для планирования природоохранных мероприятий.

Разработанная система является универсальной: она применима как к отдельным озёрам, так и к крупным региональным системам. Благодаря геодезической корректности, модель может использоваться в международных исследованиях, где важно обеспечить сопоставимость результатов при анализе водных систем разных климатических зон.

В перспективе возможно расширение модели за счёт:

- интеграции данных о глубине (по ЦМР дна или батиметрическим картам);
- внедрения временного анализа (time-series NDWI) для изучения сезонных изменений;
- автоматической оценки ошибок и статистического доверительного интервала для каждого параметра.

Главным результатом исследования является создание универсальной, автоматизированной и геодезически корректной модели морфометрического анализа озёр. Она сочетает методы дистанционного зондирования и ГИС анализов, объединяя их в единую вычислительную архитектуру.

Полученная система представляет собой шаг к стандартизации гидрологического морфометрического анализа и может стать частью более широких климато-гидрологических исследований.

**Выводы.** Проведённое исследование позволяет сформулировать следующие выводы:

1. Разработана интегрированная модель морфометрического анализа озёр, реализованная в среде ArcMap с использованием языка Python и библиотеки ArcPy. Модель включает последовательные этапы — от выделения водных поверхностей (NDWI) до вычисления производных морфометрических показателей.

2. Автоматизация морфометрических расчётов позволила существенно повысить эффективность обработки данных и обеспечить воспроизводимость результатов. Все вычисления выполняются в геодезической системе координат (WGS 1984), что исключает искажения, характерные для проекционных измерений.

3. Применение индекса NDWI доказало высокую эффективность при извлечении контуров водоёмов из многоспектральных спутниковых изображений Sentinel-2. Метод обеспечивает стабильные результаты при различных условиях освещения и сезонных изменениях, что делает его универсальным инструментом гидрологического мониторинга.

4. Алгоритм определения максимальной длины озера обеспечивает автоматическое выявление продольной оси водоёма и формирование линейного объекта, отражающего его морфологическую ориентацию. Этот параметр имеет ключевое значение для оценки ветрового разгона волн и морфогенетической типизации озёр.

5. Интеграция атрибутивных данных создала унифицированную структуру морфометрической базы данных, что позволило объединить геометрические, линейные и аналитические параметры в одной таблице, упрощая дальнейший анализ и статистическую обработку.

6. Геодезический расчёт площади и периметра обеспечивает метрическую корректность анализа, позволяя выполнять измерения независимо от широты и проекции. Отклонения между геодезическими и топографическими измерениями составляют менее 2 %.

7. Расчёт средней ширины озера завершает аналитический цикл и формирует производный параметр, отражающий морфометрическую структуру водоёма.

Полученные значения средней ширины озера согласуются с классическими закономерностями, установленными в лимнологии.

8. Модель доказала универсальность и гибкость: она может быть применена для озёр любых размеров и типов, как в локальных, так и в региональных исследованиях. Пакетная обработка делает возможным масштабное использование системы для оценки пространственно-временных изменений озёрных систем.

9. Гидрологическое значение модели заключается в возможности количественного анализа влияния формы озёр на их водный баланс, термический режим и динамику течений. Модель также может применяться при мониторинге климатических изменений и оценке воздействия антропогенных факторов.

10. Перспективы дальнейшего развития включают интеграцию временных рядов NDWI, использование батиметрических данных для расчёта объёмов водоёмов и развитие модулей автоматической валидации результатов. Это позволит расширить функциональность модели и применить её в задачах климато-гидрологического моделирования.

**Использованная литература:**

1. Алексеев В.В. Морфометрический анализ озёрных котловин. Москва: Изд-во МГУ, 1973. 184 с.

2. Гидрометеорология и гидрохимия озёр мира. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1991. Т. 1. 304 с.

3. Зайцев А.И. Морфометрические показатели в гидрологии и лимнологии. Ленинград: Наука, 1984. 212 с.

4. Ляпин В.А. Морфометрия озёр и водохранилищ. Москва: Гидрометеоиздат, 1989. 245 с.

5. Морфология и динамика озёрных котловин / под ред. Н. А. Пузаченко. Москва: Наука, 2002. 318 с

6. Фридман А.Л. Геоинформационные методы в гидрологии. М.: Логос, 2015. 272 с.

7. Burrough P.A., McDonnell R.A. (2000), *Principles of Geographical Information Systems*, Oxford, 490 p.

8. Du Y., et al. (2012), Water bodies extraction from Landsat imagery using NDWI and MNDWI indices: a comparative analysis, *Remote Sensing Letters*, Vol. 3(6), pp. 491–499.

9. Evans I. S., Minár J. (2011) A classification of geomorphometric variables based on surfaces, lines and points, Geomorphology, Vol. 129, pp. 497–510.

10. Gao B. C. (1996), NDWI — A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 58, pp. 257–266.

11. Goodchild M. F. (2007), *Geographical Information Science and Systems*, New York.

12. Hutchinson G. E. (1957), *A Treatise on Limnology*, New York, 1115 p.

13. Li J., Shao Q. (2022), An improved algorithm for lake boundary delineation and morphometric analysis, *Water Resources Research*, Vol. 58(7).

14. McFeeters S. K. (1996), The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features, *International Journal of Remote Sensing,* Vol. 17(7), pp. 1425–1432.

15. Müller H., et al. (2020), Integrated GIS based analysis of lake morphology and hydrological parameters, *Environmental Modelling & Software,* Vol. 126, pp. 104–114.

16. Tang W., Hao Y., Zhao Y., Ning L. (2008), Research on areal feature matching algorithm based on spatial similarity, *Proc. of the Control and Decision Conference*, Yantai, pp. 3326–3330.

17. Wetzel R. G. (2001), *Limnology: Lake and River Ecosystems*, 3rd ed., San Diego, 1006 p.

## References:

1. Alekseev V. V. (1973), *Morphometric Analysis of Lake Basins,* Moscow, 184 p. (In Russ.).

2. *Hydrometeorology and Hydrochemistry of World Lakes* (1991), Leningrad, Vol. 1, 304 p. (In Russ.).

3. Zaitsev A. I. (1984), *Morphometric Indicators in Hydrology and Limnology*, Leningrad, 212 p. (In Russ.).

4. Lyapin V. A. (1989), *Morphometry of Lakes and Reservoirs*, Moscow, 245 p. (In Russ.).

5. *Morphology and Dynamics of Lake Basins*, edited by N. A. Puzachenko (2002), Mosco, 318 p. (In Russ.).

6. Fridman A.L. (2015), *Geoinformation methods in hydrology*, Moscow, 272 p. (In Russ.).

7. Burrough P.A., McDonnell R.A. (2000), *Principles of Geographical Information Systems*, Oxford, 490 p.

8. Du Y., et al. (2012), Water bodies extraction from Landsat imagery using NDWI and MNDWI indices: a comparative analysis, *Remote Sensing Letters*, Vol. 3(6), pp. 491–499.

9. Evans I. S., Minár J. (2011) A classification of geomorphometric variables based on surfaces, lines and points, Geomorphology, Vol. 129, pp. 497–510.

10. Gao B. C. (1996), NDWI — A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 58, pp. 257–266.

11. Goodchild M. F. (2007), *Geographical Information Science and Systems*, New York.

12. Hutchinson G. E. (1957), *A Treatise on Limnology*, New York, 1115 p.

13. Li J., Shao Q. (2022), An improved algorithm for lake boundary delineation and morphometric analysis, *Water Resources Research*, Vol. 58(7).

14. McFeeters S. K. (1996), The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features, *International Journal of Remote Sensing,* Vol. 17(7), pp. 1425–1432.

15. Müller H., et al. (2020), Integrated GIS based analysis of lake morphology and hydrological parameters, *Environmental Modelling & Software,* Vol. 126, pp. 104–114.

16. Tang W., Hao Y., Zhao Y., Ning L. (2008), Research on areal feature matching algorithm based on spatial similarity, *Proc. of the Control and Decision Conference*, Yantai, pp. 3326–3330.

17. Wetzel R. G. (2001), *Limnology: Lake and River Ecosystems*, 3rd ed., San Diego, 1006 p.

*Сведения об авторе:*

**Мягков Сергей Сергеевич** – Научно-исследовательский гидрометеорологический институт (Ташкент, Узбекистан), доктор философии (PhD), старший научный сотрудник. E-mail: s.s.myagkov@gmail.com

*Information about author:*

**Sergey S. Myagkov** – Hydrometeorological Research Institute (Tashkent, Uzbekistan), PhD, Junior Researcher. E-mail: s.s.myagkov@gmail.com

**Для цитирования:**

Мягков С.С. Модель автоматизированного морфометрического анализа озёр с применением ГИС-технологий // Центральноазиатский журнал географических исследований. 2025. № 3-4. С. 99-113.

**For citation:**

Myagkov S.S. (2025), A model of automated morphometric analysis of lakes using GIS technologies, *Central Asian Journal of Geographical Sciences*, No. 3-4, pp. 99-113. (In Russ.).