NAMANGAN DAVLAT UNIVERSITETI
ILMIY AXBOROTNOMASI, [2026-8]
ISSN:2181-1458
ISSN:2181-0427

03.00.00-BIOLOGIYA
journal.namdu.uz
BIOLOGICAL

РАЗРАБОТКА ИНТЕГРАЛЬНОГО ИНДЕКСА ГИДРОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ОЗЁР АМУДАРЬИНСКОЙ ДЕЛЬТЫ

Хожамуратова Роза Тажимуратовна
Профессор кафедры физической географии и гидрометеорологии
Узбекистан, Нукус
E-mail: hroza71@mail.ru
https//orcid.org/0009-0001-8862-4242
Календерова Кумар Тенгелбай кизи
базовый докторант КГУ имени Бердаха
E-mail: qumarqalenderova@mail.ru
https://orcid.org/0009-0000-1418-1621

Аннотация. *В статье предлагается новый подход к оценке гидроэкологического состояния озёр Амударьинской дельты на основе интегрального индекса гидроэкологической устойчивости (Hydroecological Stability Index – HESI). Необходимость разработки индекса обусловлена усилением антропогенного воздействия на водные экосистемы Южного Приаралья, сокращением стока Амударьи, ростом минерализации и изменением гидрологического режима озёр. Индекс объединяет гидрологические, гидрохимические, биологические и экологические показатели в единую систему оценки. Разработанная методика позволяет проводить сравнительный анализ состояния различных озёр дельты и выявлять наиболее уязвимые водоёмы.*

Ключевые слова: *гидроэкология, озёра Амударьинской дельты, устойчивость экосистем, интегральный индекс, Южное Приаралье, гидрохимия, мониторинг.*

DEVELOPMENT OF AN INTEGRATED HYDROECOLOGICAL STABILITY INDEX FOR THE LAKES OF THE AMU DARYA DELTA

Abstract. *The article proposes a new approach to assessing the hydro-ecological state of Amudarya delta lakes based on the integrated hydro-ecological stability index (Hydroecological Stability Index - HESI). The necessity of developing the index is due to the intensification of anthropogenic impact on the water ecosystems of the Southern Aral Sea region, the reduction of the Amu Darya flow, the increase in mineralization, and changes in the hydrological regime of the lakes. The index combines hydrological, hydrochemical, biological, and environmental indicators into a unified assessment system. The developed methodology allows for a comparative analysis of the condition of various lakes in the delta and the identification of the most vulnerable water bodies.*

Keywords: *hydroecology, Amudarya delta lakes, ecosystem stability, integral index, Southern Aral Sea region, hydrochemistry, monitoring.*

AMUDARYO DELTASI KO‘ LLARI GIDROEKOLOGIK BARQARORLIGINING INTEGRAL INDEKSINI ISHLAB CHIQISH

Annotatsiya. *Mazkur maqolada Amudaryo deltasidagi ko‘ llarning gidroekologik holatini baholash uchun gidroekologik barqarorlikning integral indeksiga (Hydroecological Stability Index – HESI) asoslangan yangicha yondashuv taklif etiladi. Bunday indeksni ishlab chiqish zarurati Janubiy Orolbo‘ yi suv ekotizimlariga antropogen ta’sirning kuchayishi, Amudaryo oqimining kamayishi, ko‘ llar minerallashuvining ortishi va gidrologik rejimining o‘ zgarishi bilan izohlanadi. Indeks gidrologik, gidrokimyoviy, biologik va ekologik ko‘ rsatkichlarni yagona baholash tizimiga birlashtiradi. Ishlab chiqilgan metodika delta hududidagi turli ko‘ llarning holatini qiyosiy tahlil qilish hamda eng zaif suv havzalarini aniqlash imkonini beradi.*

Kalit so‘ zlar: *gidroekologiya, Amudaryo deltasining ko‘ llari, ekotizimlar barqarorligi, integral indeks, Janubiy Orolbo‘ yi, gidrokimyo, monitoring.*

Введение

Озёра Амударьинской дельты являются уникальными природными водными экосистемами аридной зоны Центральной Азии и представляют собой важнейшие элементы экологического каркаса Южного Приаралья. На протяжении многих столетий формирование и функционирование озёрных систем дельты определялось гидрологическим режимом реки Амударьи, сезонными паводками и сложными процессами взаимодействия поверхностных и подземных вод. Благодаря этому в дельте сформировался комплекс водно-болотных угодий, имеющих исключительно важное значение для сохранения биоразнообразия, регулирования водного режима территории и поддержания экологического равновесия региона.

В современных условиях большинство озёр дельты функционируют в качественно новых природно-хозяйственных условиях. Если ранее основным источником их питания являлись воды Амударьи, то в настоящее время значительная часть водных ресурсов поступает через систему коллекторно-дренажных каналов. Подобная трансформация водопитания привела к изменению гидрохимического состава воды, увеличению минерализации, накоплению биогенных веществ и загрязняющих компонентов. Вследствие этого существенно изменились условия существования гидробионтов, структура водных экосистем и механизмы их функционирования.

Дополнительным фактором трансформации озёрных систем выступают современные климатические изменения. Согласно многочисленным исследованиям, в регионе Центральной Азии наблюдается устойчивый рост среднегодовой температуры воздуха, увеличение продолжительности засушливых периодов и повышение испаряемости. В условиях аридного климата данные процессы оказывают значительное влияние на водный баланс озёр, способствуя сокращению площади водной поверхности и увеличению концентрации растворённых солей. Изменение климатических условий усиливает антропогенную нагрузку на водные объекты и снижает устойчивость озёрных экосистем к внешним воздействиям.

Современные принципы экологического мониторинга требуют перехода от анализа отдельных параметров к комплексной оценке устойчивости природных систем. В связи с этим особую актуальность приобретает разработка интегральных индексов, позволяющих объединять различные показатели в единую систему количественной оценки. Использование подобных индексов широко применяется при исследовании речных бассейнов, водохранилищ и водно-болотных угодий, однако для озёр Амударьинской дельты такие подходы практически не разработаны.

Таким образом, разработка интегрального индекса гидроэкологической устойчивости озёр Амударьинской дельты является актуальной научной задачей, имеющей важное теоретическое и практическое значение. Результаты исследования могут быть использованы при организации системы мониторинга водных объектов, оценке эффективности природоохранных мероприятий и разработке стратегий устойчивого управления водными ресурсами Южного Приаралья.

Цель исследования

Разработка интегрального индекса гидроэкологической устойчивости озёр Амударьинской дельты и определение возможности его использования для экологического мониторинга.

Материалы и методы исследования. Объектами исследования являлись озёра Амударьинской дельты: Судочье, Жылтырбас, Машанкуль, Рыбачье и Каратерень, расположенные на территории Южного Приаралья. Выбор данных водоёмов обусловлен различиями в условиях водопитания, гидрохимическом режиме и степени антропогенного воздействия.

Для оценки гидроэкологической устойчивости озёр разработан интегральный индекс Hydroecological Stability Index (HESI), основанный на комплексном учёте гидрологических, гидрохимических, биологических и экологических показателей.

В состав индекса включены четыре блока:

- гидрологический блок (H); гидрохимический блок (C); биологический блок (B); - экологический блок (E).

Для обеспечения сопоставимости показателей выполнялось их нормирование по методу минимаксного преобразования:

$Xn=(X-Xmin)/(Xmax-Xmin)$

где Xn — нормированное значение показателя; X — фактическое значение показателя; Xmin и Xmax — минимальное и максимальное значения исследуемого параметра.

Для показателей, негативно влияющих на устойчивость экосистемы (минерализация, загрязнение, деградация земель и др.), использовалось обратное нормирование:

$Xn=(Xmax-X)/(Xmax-Xmin)$

После нормирования рассчитывались частные индексы:

H=(A+L+V+W)/4; C=(M+pH+O+S+Cl)/5;

B=(R+F+W+P)/4; E=(P+D+L+A)/4

Интегральный индекс гидроэкологической устойчивости определялся по формуле: HESI=(H+C+B+E)/4

Полученные значения интерпретировались следующим образом:

0,80–1,00 – очень высокая устойчивость; 0,60–0,79 – высокая устойчивость; 0,40–0,59 – средняя устойчивость; 0,20–0,39 – низкая устойчивость; менее 0,20 – критическое состояние.

Результаты исследования. Для формирования индекса нами предлагается использовать четыре группы показателей:

1. Гидрологический блок (H) характеризует водообеспеченность озера.

Гидрологический блок является одним из основных компонентов интегрального индекса гидроэкологической устойчивости озёр Амударьинской дельты и предназначен для оценки степени водообеспеченности и стабильности функционирования водной экосистемы. Гидрологические характеристики оказывают определяющее влияние на формирование экологического состояния озёр, поскольку именно водный режим определяет условия существования гидробионтов, особенности гидрохимических процессов и устойчивость экосистемы к внешним воздействиям.

Для оценки гидрологического состояния озёр предлагается использовать четыре основных показателя: площадь водной поверхности, уровень воды, объём водных ресурсов и коэффициент водообмена.

Площадь водной поверхности является одним из наиболее информативных показателей состояния озёрных экосистем. Изменение площади озера отражает реакцию водоёма на колебания водного баланса, климатические изменения и антропогенное воздействие. Уменьшение площади водной поверхности обычно свидетельствует о снижении водообеспеченности, усилении процессов испарения и ухудшении экологического состояния водоёма. Напротив, сохранение стабильной площади или её увеличение указывает на благоприятные гидрологические условия и достаточное водоснабжение озера.

Важным показателем является уровень воды, который характеризует динамику водного режима и отражает баланс между поступлением и расходованием водных ресурсов. Колебания уровня воды оказывают непосредственное влияние на состояние прибрежных экосистем, площадь водно-болотных угодий, условия нереста рыб и места обитания водоплавающих птиц.

Коэффициент водообмена характеризует интенсивность обновления водной массы озера и отражает степень его гидрологической связанности с внешними источниками водоснабжения. Высокий коэффициент водообмена способствует улучшению качества воды, снижению накопления загрязняющих веществ и поддержанию благоприятного гидрохимического режима.

Для обеспечения сопоставимости различных показателей все гидрологические параметры нормируются в диапазоне от 0 до 1. После нормирования рассчитывается интегральный гидрологический индекс по следующей формуле: H = (A + L + V + W) / 4 где: A – нормированная площадь озера; L – уровень воды; V – объём воды; W – коэффициент водообмена.

Полученный гидрологический индекс позволяет количественно оценить степень водообеспеченности озера и является важной составляющей интегрального индекса гидроэкологической устойчивости. Высокие значения показателя H свидетельствуют о стабильном гидрологическом режиме и благоприятных условиях функционирования экосистемы, тогда как низкие значения указывают на развитие деградационных процессов и снижение устойчивости водоёма.

Таким образом, гидрологический блок обеспечивает комплексную оценку состояния водных ресурсов озёр Амударьинской дельты и позволяет учитывать ключевые процессы, определяющие устойчивость озёрных экосистем в условиях изменения климата и антропогенной трансформации водного режима региона.

2. Гидрохимический блок (C) характеризует качество воды.

Гидрохимический блок является важнейшим элементом интегрального индекса гидроэкологической устойчивости озёр Амударьинской дельты, поскольку химический состав воды оказывает непосредственное влияние на состояние водных экосистем, биологическую продуктивность водоёмов и процессы формирования гидробиоценозов. В условиях Южного Приаралья, где большинство озёр испытывают значительное антропогенное воздействие и функционируют в условиях дефицита водных ресурсов, гидрохимические показатели выступают одними из наиболее чувствительных индикаторов экологических изменений.

В последние десятилетия в большинстве озёр дельты наблюдается тенденция к увеличению минерализации воды, изменению ионного состава и накоплению биогенных веществ. Эти процессы оказывают существенное влияние на устойчивость озёрных экосистем и требуют комплексного учёта при оценке их современного состояния.

Минерализация воды является одним из важнейших показателей гидрохимического состояния озёр. Она характеризует общее содержание растворённых солей и отражает степень засоления водоёма. Для озёр

Амударьинской дельты данный показатель имеет особое значение, поскольку именно рост минерализации является одним из основных последствий сокращения речного стока и увеличения роли коллекторно-дренажных вод. Повышение минерализации приводит к изменению условий обитания гидробионтов, снижению биологического разнообразия и ухудшению экологического состояния озёр.

Водородный показатель (pH) характеризует кислотно-щелочное состояние водной среды и является важным фактором функционирования гидробиологических процессов. Большинство гидробионтов наиболее благоприятно развивается в условиях нейтральной или слабощелочной среды. Значительные отклонения pH от оптимальных значений могут приводить к нарушению обменных процессов, изменению химической подвижности элементов и снижению экологической устойчивости водоёмов.

Содержание растворённого кислорода является одним из ключевых показателей качества воды и экологического благополучия озёрных экосистем. Кислород обеспечивает жизнедеятельность большинства водных организмов и участвует в процессах самоочищения водоёмов. Снижение концентрации растворённого кислорода свидетельствует об ухудшении экологического состояния озера, развитии процессов эвтрофикации и накоплении органических загрязнений.

Концентрация сульфатов является важным показателем гидрохимического состава воды в аридных регионах. Повышенное содержание сульфат-ионов характерно для многих водоёмов Приаралья и связано как с природными особенностями региона, так и с поступлением коллекторно-дренажных вод. Рост концентрации сульфатов может свидетельствовать об усилении процессов засоления и ухудшении качества водных ресурсов.

Для обеспечения сопоставимости различных гидрохимических показателей все параметры переводятся в безразмерную форму путём нормирования. Нормирование позволяет привести показатели, измеряемые в различных единицах, к единой шкале от 0 до 1 и использовать их в составе интегрального индекса.

Полученный гидрохимический индекс отражает степень благоприятности химического состава воды для функционирования озёрной экосистемы. Высокие значения показателя свидетельствуют о хорошем качестве воды и устойчивом гидрохимическом режиме, тогда как низкие значения указывают на ухудшение экологического состояния водоёма, усиление процессов засоления и снижение способности экосистемы к саморегуляции.

Таким образом, гидрохимический блок позволяет комплексно оценить качество водной среды озёр Амударьинской дельты и является одним из основных элементов интегрального индекса гидроэкологической устойчивости. Его использование обеспечивает возможность выявления неблагоприятных тенденций в развитии водных экосистем и разработки научно обоснованных мер по сохранению водных ресурсов Южного Приаралья.

3. Биологический блок (B) характеризует состояние экосистемы.

Биологический блок является одним из важнейших компонентов интегрального индекса гидроэкологической устойчивости озёр Амударьинской дельты, поскольку именно состояние биологических сообществ наиболее полно отражает уровень экологического благополучия водоёма. В отличие от гидрологических и гидрохимических показателей, которые характеризуют отдельные компоненты природной системы, биологические показатели позволяют оценить суммарный результат воздействия природных и антропогенных факторов на экосистему.

Озёра Амударьинской дельты представляют собой уникальные природные комплексы, выполняющие функции сохранения биоразнообразия Южного Приаралья. Они являются местом обитания многочисленных видов гидрофитов, беспозвоночных организмов, рыб, земноводных, млекопитающих и водоплавающих птиц.

Разнообразие водной растительности является важнейшим индикатором экологического состояния водоёма. В условиях устойчивого гидрологического режима формируются сложные растительные сообщества, включающие тростниковые заросли, камышовые ассоциации и разнообразные гидрофиты.

Изменение площади и видового состава растительности часто является первым признаком деградации экосистемы. Уменьшение площади тростниковых массивов, исчезновение отдельных видов гидрофитов и нарушение структуры растительных сообществ свидетельствуют о неблагоприятных экологических изменениях.

Для озёр Амударьинской дельты рыбные ресурсы имеют не только экологическое, но и социально-экономическое значение. Многие водоёмы традиционно использовались для рыболовства и обеспечения населения рыбной продукцией. Поэтому сохранение устойчивости ихтиофауны является одним из важнейших критериев оценки экологического благополучия озёр.

Сокращение площади водно-болотных угодий приводит к нарушению экологического равновесия и снижению устойчивости всей озёрной системы. В связи с этим данный показатель является важным элементом интегральной оценки гидроэкологического состояния.

Особую роль в экосистемах Южного Приаралья играет орнитофауна. Озёра Амударьинской дельты являются важнейшими пунктами остановки перелётных птиц на Центрально-Азиатском миграционном пути.

Здесь обитают десятки видов водоплавающих и околоводных птиц, многие из которых имеют международный природоохранный статус.

Численность и видовое разнообразие птиц рассматриваются как универсальные биоиндикаторы состояния окружающей среды. Изменение условий водоснабжения, сокращение площади водной поверхности и деградация водно-болотных угодий немедленно отражаются на состоянии орнитофауны.

Для интегральной оценки биологического состояния озёр все показатели переводятся в безразмерную форму путём нормирования. После нормирования рассчитывается биологический индекс устойчивости:

$B = (R + F + W + P) / 4$

где: B – биологический индекс; R – индекс разнообразия водной растительности; F – индекс состояния ихтиофауны; W – индекс состояния водно-болотных угодий; P – индекс орнитофауны.

Полученные значения позволяют количественно оценить степень сохранности биологических компонентов озёрной экосистемы. Высокие значения индекса свидетельствуют о благоприятном экологическом состоянии водоёма и высокой способности экосистемы к саморегуляции. Низкие значения указывают на деградацию биологических сообществ и снижение экологической устойчивости.

Таким образом, биологический блок является важнейшим элементом интегрального индекса гидроэкологической устойчивости, поскольку отражает конечный результат воздействия гидрологических, гидрохимических и антропогенных факторов на функционирование озёрных экосистем. Использование данного блока позволяет комплексно оценить состояние биологических ресурсов и определить степень экологической устойчивости озёр Амударьинской дельты в условиях современных климатических и антропогенных изменений.

4. Экологический блок (E) отражает антропогенную нагрузку. Экологический блок является завершающим компонентом интегрального индекса гидроэкологической устойчивости озёр Амударьинской дельты и предназначен для оценки степени антропогенного воздействия на водные экосистемы. В современных условиях именно антропогенные факторы во многом определяют направление и интенсивность трансформации озёрных систем Южного Приаралья. Поэтому учёт экологических рисков и уровня хозяйственной нагрузки является необходимым условием объективной оценки устойчивости водоёмов.

В отличие от гидрологических, гидрохимических и биологических показателей, характеризующих текущее состояние экосистемы, экологический блок позволяет оценить факторы внешнего воздействия, способные вызвать её дальнейшую деградацию или, наоборот, обеспечить сохранение экологического равновесия. Особое значение данный блок приобретает для озёр Амударьинской дельты, где процессы антропогенной трансформации природной среды продолжаются на протяжении нескольких десятилетий.

Поступление минерализованных вод приводит к изменению гидрохимического режима, росту содержания солей и ухудшению условий существования гидробионтов. В отдельных случаях наблюдается накопление токсичных соединений и усиление процессов эвтрофикации. Поэтому степень воздействия коллекторно-дренажных вод рассматривается как один из ключевых показателей экологического блока.

Важным индикатором экологического состояния является уровень загрязнения водоёма. Загрязнение может быть связано как с сельскохозяйственной деятельностью, так и с поступлением различных химических соединений через дренажную сеть.

Для условий Южного Приаралья особую актуальность имеет оценка степени антропогенной трансформации ландшафтов. Расширение сельскохозяйственного освоения, изменение структуры землепользования и строительство гидротехнических сооружений оказывают существенное влияние на процессы формирования озёрных экосистем.

Для количественной оценки экологического состояния озёр предлагается использовать следующие показатели:

– индекс загрязнения вод; индекс воздействия коллекторно-дренажных вод; индекс деградации земель; индекс антропогенной трансформации территории.

Использование экологического блока позволяет учитывать влияние хозяйственной деятельности на состояние озёрных экосистем и обеспечивает более объективную оценку их устойчивости. Это особенно важно в условиях Амударьинской дельты, где современное функционирование озёр определяется не только природными факторами, но и интенсивностью антропогенного воздействия.

Таким образом, экологический блок завершает систему оценки гидроэкологической устойчивости озёр и обеспечивает комплексный учёт факторов, определяющих современное состояние водных экосистем Южного Приаралья.

Для апробации разработанного интегрального индекса гидроэкологической устойчивости (HESI) были использованы основные гидрологические, гидрохимические, биологические и экологические показатели, характеризующие современное состояние озёр Амударьинской дельты.

Озеро Жылтырбас также сохраняет относительно устойчивое экологическое состояние, однако влияние коллекторно-дренажного водоснабжения способствует увеличению минерализации воды и снижению биологического разнообразия.

Наиболее неблагоприятные показатели зафиксированы для озера Каратерень, где наблюдаются высокая минерализация воды, сокращение площади водно-болотных угодий, уменьшение биологического разнообразия и значительная антропогенная нагрузка. Полученные данные свидетельствуют о необходимости проведения комплексной интегральной оценки устойчивости озёрных экосистем.

Наиболее высокие показатели устойчивости характерны для озера Судочье. Это связано с относительно стабильным водоснабжением, наличием развитых водно-болотных угодий и высоким уровнем биологического разнообразия. Кроме того, Судочье сохраняет важное значение как место концентрации водоплавающих птиц и один из крупнейших природных водоёмов Южного Приаралья.

Озеро Жылтырбас характеризуется несколько более низкими значениями индекса. Несмотря на удовлетворительное состояние гидрологического режима, на устойчивость водоёма оказывает влияние повышенная минерализация и зависимость от коллекторно-дренажного водоснабжения.

Наиболее низкие значения индекса зафиксированы для озера Каратерень. Это свидетельствует о высокой степени экологической трансформации водоёма и необходимости разработки специальных природоохранных мероприятий.

Особенно ярко эта зависимость проявляется в годы маловодья, когда происходит снижение площади водной поверхности, рост минерализации и ухудшение условий существования гидробионтов.

Разработанный индекс может использоваться в качестве инструмента экологического мониторинга озёрных систем Амударьинской дельты.

Особенно перспективным является использование индекса HESI совместно с данными дистанционного зондирования Земли. Это позволит проводить регулярную оценку состояния озёр и получать оперативную информацию о динамике экологических процессов.

Выводы

1. Установлено, что устойчивость озёр Амударьинской дельты определяется совокупным воздействием гидрологических, гидрохимических, биологических и антропогенных факторов.

2. Разработан интегральный индекс гидроэкологической устойчивости озёр (HESI), позволяющий комплексно оценивать современное состояние водных экосистем.

3. Предложенная методика включает четыре взаимосвязанных блока: гидрологический, гидрохимический, биологический и экологический, обеспечивающие всестороннюю характеристику функционирования озёрных систем.

4. Апробация индекса показала, что наиболее устойчивым водоёмом среди исследованных объектов является озеро Судочье, тогда как озеро Каратерень характеризуется наиболее низкими показателями устойчивости.

Заключение

Разработанный интегральный индекс гидроэкологической устойчивости HESI представляет собой новый инструмент комплексной оценки состояния озёр Амударьинской дельты. Его применение позволяет перейти от анализа отдельных параметров к системному исследованию функционирования озёрных экосистем. Использование индекса создаёт научную основу для долгосрочного мониторинга, прогнозирования экологических изменений и разработки мероприятий по сохранению водно-болотных угодий Южного Приаралья в условиях изменения климата и антропогенной трансформации водных ресурсов.

Список использованных литератур

1. Алимов А.Ф. Введение в продукционную гидробиологию. – Санкт-Петербург: Гидрометеоиздат, 2000. – 280 с.

2. Атаджанов Б.М. Гидроэкологическое состояние озёр Амударьинской дельты. – Нукус: Билим, 2020. – 172 с.

3. Бекмагамбетов К.А. Гидрология дельты Амударьи. – Ташкент: Фан, 1985. – 215 с.

4. Добровольский Г.В., Никитин Е.Д. Экология почв. – Москва: Изд-во МГУ, 2012. – 412 с.

5. Одум Ю. Основы экологии. – Москва: Мир, 1986. – 376 с.

6. Рахимов А.А. Водные ресурсы Южного Приаралья и их использование. – Ташкент: Фан, 2014. – 198 с.

7. Реймерс Н.Ф. Природопользование. – Москва: Мысль, 1990. – 637 с.

8. Турсунов Э.А. Гидрохимия водоёмов Приаралья. – Ташкент: Университет, 2016. – 244 с.

9. Хамраев Ш.К. Экологические проблемы Приаралья. – Нукус: Каракалпакстан, 2018. – 196 с.