

Введение. В современном мире остро стоит вопрос о защите экологической среды, как в целом, так и всех ее компонентов. Основой жизни на Земле является вода поэтому необходим постоянный мониторинг и анализ состояния водных объектов от разных негативных воздействий: природных и антропогенных. Для таких задач и используют ГИС-технологии совместно с ДДЗ. С помощью данных технологий можно своевременно анализировать и решать множество проблем.

Актуальность исследования. Актуальность заключается в выявлении изменений состояния воды на участке реки Волга с помощью ГИС технологий, данных ДДЗ и спектральных индексов.

В связи с этим, *цель магистерской работы* - рассмотреть и проанализировать развитие процессов эвтрофикации водоема вблизи Волжской ГЭС.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить *следующие задачи*:

- дать общую географическую характеристику объектам исследования;
- охарактеризовать существующие используемые водные индексы;
- рассмотреть корреляцию температурных показателей и водных индексов;
- проанализировать индексы мутности и эвтрофикации;
- проследить периоды наибольшей замутненности участка реки.

Материалы исследования. В процессе исследования применялись такие методы исследования как: научно-литературный и практико-аналитический, а также работа с ГИС системами и применялся метод анализа данных ДДЗ. В данной работе использовались научные статьи, книжные издания, источники сети Интернет и спектральные индексы.

Магистерская работа состоит из 3 разделов, введения, заключения, списка использованных источников. Кроме того, практическая часть проиллюстрирована приложениями.

Основное содержание работы.

1 Использование ДДЗ для анализа водной поверхности

В первом разделе описано применение ДДЗ для анализа водной поверхности с помощью спектральных индексов.

Дистанционное зондирование Земли (ДДЗ) – это наблюдение поверхности Земли с помощью наземных, авиационных и космических средств, которые оснащены различными видами съемочной аппаратуры [1].

Спутниковые снимки содержат спектральную информацию об объекте. Отраженный свет поступает на модуль спутниковой системы и на основе данных коэффициента отражения можно определить поверхность: лес, рельеф, вода.

Спектральные данные позволяют анализировать территорию сравнивая коэффициенты отражения природных объектов и оценивать их состояние [2].

Данные дистанционного зондирования в отношении водных объектов позволяют проводить исследования в различных областях: водозащитных и гидротехнических сооружений, экологического состояния водных объектов, русловых процессов, состояния водоохранных наводнений и т.д. [3].

Для описания водного объекта в данном исследовании используются основные индексы, которые в полной мере способны отобразить ситуацию по состоянию воды в реке:

1. водные индексы NDWI, MNDWI;
2. индекс NDTI и мутности;
3. индекс Хлорофилл-А и цвета.

NDWI/MNDWI относят к первой группе индексов, исследуемых в данной работе. Нормализованный разностный водный индекс (NDWI) – это разностный водный индекс, используемый для определения и мониторинга изменений содержания поверхностных вод. NDWI является важным показателем для оценки мутности вод [4]. В данном индексе диапазон значений может колебаться от -1.0 до 1.0.

После многочисленных исследований, было выявлено что NDWI не является достаточно эффективным индексом для выявления водных поверхностей и отделения комбинированных поверхностей. В 2006 году был разработан индекс MNDWI - модифицированный нормализованный разностный

водный индекс. Он определяется с использованием 2 и 5 спектральных каналов Landsat 5/7 или 3 и 6 каналов Landsat 8 [4].

Данный алгоритм эффективно подавляет и удаляет шумовые эффекты с поверхности. Благодаря улучшению значений воды по индексу MNDWI происходит более точное извлечение водных данных, так как все отрицательные значения не будут учитываться, они будут удалены [4]. Выводимые значения индекса идентичны NDWI и могут находиться в диапазоне от -1.0 до 1.0, вода имеет значение больше 0.

Ко второй группе относятся индексы мутности. Нормализованный разностный индекс мутности (NDTI) является показателем мутности воды, характеризует уменьшение прозрачности воды в связи с наличием примесей, взвесей, а также развитием планктона в водном объекте. Мутность может быть вызвана стоком земель, загрязнением, эрозии береговой линии [4]. NDTI выводит значения между -1.0 и 1.0, чем выше значение данного индекса, тем более высокая мутность воды в водоеме.

Индекс мутности (TI) позволяет сравнить показатели разных участков водоёмов и разные водоёмы в одно и то же время. Чем выше величина мутности, тем ниже коэффициент отражения водной поверхности. В периоды интенсивного развития фитопланктона мутность воды возрастает. Расчёт индекса мутности позволяет регистрировать временные и пространственные изменения в водоёме по этому показателю.

К третьей группе индексов относятся: Индекс Хлорофилл-А (Cl_a) и индекс цвета (Color-I). Индекс Хлорофилл-А разработан для расчёта индекса концентрации Хлорофилла-А.

Хлорофилл-А поглощает свет в фиолетовой, голубой и красной частях спектра, отражая в основном зелёный цвет, что и придаёт ему характерную окраску. Это дает возможность отследить интенсивность фотосинтеза по мультиспектральным снимкам, использованным в данной работе. Чем выше показатель - тем больше выражены процессы эвтрофирования, чем ниже - тем меньше. «Цветение» воды обычно наблюдается в застойных непроточных

водоемах или в водоемах со слабым течением и избытком питательных веществ. Индекс хлорофилла-а также отражает степень развития фитопланктона в водоемах [5].

Концентрация хлорофилла-а (фотосинтезирующего пигмента) является важным показателем индекса, который содержится в каждом виде фитопланктона. При оценке биопродуктивности используются соотношения концентрации хлорофилла и спектральных характеристик восходящего из водного объекта излучения. Применяемые в настоящее время алгоритмы оценки концентрации хлорофилла-а по данным спутниковых сканеров цвета могут приводить к ошибочным результатам [6]. Для того чтобы получать более достоверные результаты, необходимо проводить корректировку алгоритмов для высокопродуктивных и мутных прибрежных, где фитопланктон является не единственным фактором, определяющим их оптические свойства.

Индекс цвета (Color-I) важен для исследования состояния водных объектов, особенно таких показателей, как мутность, концентрация хлорофилла в воде, плотность и пространственное распределение планктонных водорослей.

2 Описание участка реки Волга вблизи Волжской ГЭС

Во втором разделе представлено описание объекта исследования и его изменения после создания Волжской ГЭС. Проанализированы возникшие изменения климата, рельефа, гидрологического режима реки, природные изменения, гидрологического режима реки.

Больше всего воздействия оказывают на берега ветровые волны и колебания уровней воды. Происходят процессы абразии, аккумуляции смытого материала и перенос его вдоль берегов.

Преобразование гидрологического режима рек приводит к изменению: уровня воды, скорости течения, волнового режима, термического режима, испарения, льдообразованию и гидрохимического режима.

При сооружении ГЭС произошло перераспределение стока реки, изменяется и ее уровень, а также волновые, термические и ледовые режимы. Скорости течения реки уменьшаются в десятки раз. В отдельных частях

водохранилища возникли застойные зоны. Так, если до сооружения гидроузла скорость течения Волги в межень составляла 0.8 – 1.0 м/сек, а в периоды половодий - 2 м/сек, то после зарегулирования, даже в половодье течение не превышает 0.5 – 0.7 м/сек. Благодаря чему влияние течений на размыв дна и берегов водохранилища значительно снизилось по сравнению с естественными условиями [7].

Влияния ГЭС на климат оно выражается в различных зонах неодинаково. В зоне недостаточного увлажнения это влияние затухает быстрее и резче, чем в зоне избыточного увлажнения. Происходит запаздывание на несколько дней сроков снеготаяния весной и установления снежного покрова осенью (зимой), уменьшение амплитуды колебаний суточных температур воздуха весной и в первой половине лета, вследствие чего меняется испарение с поверхности почвы, возрастает влажность воздуха и т.д.

Изменился и тепловой режим в осенне-зимний период за счет поступления более теплой воды, нагретой в водохранилище за лето. Это привело к смягчению микроклимата. Зима стала мягче, летом из-за аккумуляции тепла, выпадает больше осадков, т.к. появился естественный серьезный барьер и большая поверхность испарения. Скорость ветра увеличилась над водохранилищем в 1.2 раза, абсолютная влажность воздуха увеличилась на 8 - 10 % [8].

Изменяется также базис эрозии вместе с уровнем воды. Вследствие чего овражно-балочная сеть консервируется на водохранилище, а ниже базиса в окрестностях Волгограда, активизируется. В природном плане овражно-балочная сеть представляет собой наиболее динамичные и неустойчивые участки городской территории с активными экзогенными процессами, которые создают особо неблагоприятные условия для хозяйственной деятельности. Территория овражно-балочной сети занимает почти 25% площади Волгограда.

Гидрологические процессы на этом участке существенно преобразованы, происходит существенная деформация всех процессов. К ним относятся: уменьшение течения, смена русловых явлений на волновую абразию, изменение гидрологического режима, изменение наносов.

В бассейне Волги, в нижней его части наблюдается критическое состояние экосистемы. Оно характеризуется не столько дефицитом водных ресурсов, сколько ухудшением качества воды из-за сбрасывания в реку неочищенных сточных вод, что повлекло за собой изменения в условиях существования и развития уникальных экосистем.

3 Применение спектральных индексов для анализа динамики состояния воды

В третьем разделе указана практическая часть исследования, представлены программы, индексы, применяемые для достижения поставленной цели.

Практическую часть работы можно разделить на 5 этапов:

1. выбор материалов: литературных и картографических источников, ГИС-программ;
2. выбор периода исследования и спектральных индексов;
3. создание обзорной карты участка реки;
4. создание первичных спектральных моделей и графиков показателей индексов;
5. сравнение полученных данных с дополнительными спектральными индексами.

Объектом данного исследования являлся участок р. Волга, в районе Волжской ГЭС, который можно рассматривать как две отдельные части - прилегающая к ГЭС часть Волгоградского водохранилища, и сохранившийся коренной участок реки ниже плотины ГЭС. Одной из важных проблем после возведения каскада ГЭС на Волге стала активная эвтрофикация.

Для сравнения взяты три участка реки: вверх по течению от ГЭС, участок в непосредственной близости от плотины ГЭС, после плотины ГЭС в пределах коренного русла. Участки выбраны так, чтобы произвести анализ всего потока веществ по течению реки.

Для анализа состояния водной среды в пределах выбранных участков выбраны следующие индексы:

- нормализованный разностный водный индекс (NDWI);

- модифицированный нормализованный разностный водный индекс (MNDWI);

- индекс мутности (NDTI).

После проделанных операций по расчету спектральных индексов по формулам, были построены графики, которые отображает ситуацию по изменению мутности за период с 2005 по 2020 годы на трех участках исследования.

По данным разностного и модифицированного водных индексов, следует, что ситуация не меняется от точки среднего значения индекса, также линия тренда нисходящая, что свидетельствует о постепенном увеличении мутности.

После проделанных расчетов появилась проблема в сравнении двух спутниковых систем Landsat 5 и 8, так как каналы у модели Landsat 8 имеют более узкий диапазон значений, у модели Landsat 5 диапазон шире, в свою очередь это может привести к расхождению данных. Принято решение рассчитать индекс NDTI по данным спектральных каналов Landsat 7, несмотря на имеющуюся проблему сенсора, оставляющую «полосы» на изображениях с данного спутника. Форма участков была скорректирована таким образом, что они не попадали на участки с отсутствием данных, а потом был произведен расчет индекса NDTI.

Полученные графики не позволяют в полной мере проследить закономерность развития мутности. Несмотря на сложности приведения данных с трех спутников к единым шкалам, можно сделать определенные выводы об общем восходящем тренде замутненности воды, при этом разница показателей в различных частях реки, незначительна. Данный показатель свидетельствует о возрастающей эвтрофикации вод водохранилища, что соответственно сказывается на нижележащих проточных коренных участках Волги.

В процессе второго этапа анализа, выбран период за 5 лет с 2017 года по 2021 год, так как за это время можно проследить достаточные изменения в состоянии воды и ее процессе эвтрофирования. Сезон выбран с апреля

(увеличение стока, после таяния снега) по сентябрь (снижение температуры и увеличение стока, в следствии дождей).

Для визуализации и получения полной информации с территории исследования, было принято решение составить цветовую шкалу значений индексов – условные обозначения.

Для анализа состояния воды с помощью индексов также выполняется корреляция средней температуры воздуха и эвтрофикацию (мутности) водоема.

Комплексная оценка индексов в целом позволяет проследить основные закономерности развития процессов мутности и эвтрофикации на исследуемой части реки Волга.

1. сравнительный анализ индексов NDTI и NDWI/MNDWI между собой не позволяет проследить общую закономерность развития процессов эвтрофикации;

2. температура воздуха влияет только на водные индексы, нет прямой зависимости между индексами мутности и температурой;

3. основной период эвтрофикации лето: июнь-август, периоды замутненности: апрель, сентябрь;

4. индексы NDWI и MNDWI взаимозаменяемые, для исследования подходит один из них, вместе используются только для визуальной проверки значений.

В процессе исследования была выявлены основные закономерности развития, как мутности, так и эвтрофикации на участке реки Волга. Принято решения сравнить данные индексов, с другими спектральными индексами, для подтверждения корректности оценки развития мутности.

Период для проверки данных выбран также - 5 лет с 2017 года по 2021 год.

Для это используются индексы:

1. мутности;
2. хлорофилла-А;
3. цвета.

Основным выводом является то, что индексы ТІ и NDTI взаимозаменяемы, но только при визуальной оценке, цветовая шкала и значения индексов инвертированы.

Итоги по индексу Cl_a следующие: полученные модели индекса подтверждаются практически и теоретически – максимум концентрации хлорофилла-а приходится на май/июнь, минимум – сентябрь; данные, полученные по индексу Cl_a , не имеют зависимости от значений средних температур.

Значения индексов цвета и мутности визуально схожи за весь период исследования равный 5 годам. Показатели Color-I передают изменения мутности по всем месяцам, также как для индекса ТІ.

Модели построенные на основе индексов цвета и хлорофилла-А также схожи за весь период исследования, отличия заключаются в более насыщенной цветовой гамме, шкала была построена таким образом, чтобы охватить наибольший диапазон значений индекса цвета.

В ходе исследования индексов, применяемых для оценки состояния воды, можно сделать следующие выводы:

1. водные индексы в отличии от других исследованных индексов имеют прямую зависимость от средней температуры воздуха, индексы мутности не зависят от средней температуры и определяют сток веществ в связи с сезонными осадками, данные индексов подтверждают основные месяцы сброса веществ – апрель, сентябрь;

2. помутнение воды может способствовать развитию водорослей, объясняется это тем, что при помутнении увеличивается содержание в воде минеральных веществ, индексы цвета и хлорофилла способны определять развитие эвтрофикации в следствии повышения концентрации хлорофилла, основные месяцы - май, июнь.

3. основным участком повышенных значений мутности и эвтрофикации, где наблюдается наихудшая ситуация по состоянию воды, является участок до Волжской ГЭС.

Динамики развития процессов эвтрофикации и мутности на всех участках исследования не наблюдается, спектральные индексы, использованные в ходе исследования, не позволяют проанализировать общую динамику изменения состояния воды, с их помощью можно изучить определенный временной отрезок.

Заключение. Данные ДЗЗ совместно с ГИС-системами позволяют анализировать водные объекты, создавать модели индексов и на их основе проводить визуальную оценки и анализа процессов эвтрофирования и загрязнения водоемов. С помощью спектральных индексов можно проводить оценку качества воды в пределах месяца, года и временного отрезка, также индексы позволяют проследить основные месяцы эвтрофирования и сброса сезонного стока в реку. За период проведенных исследований равный 5 годам, происходят перепады концентрации хлорофилла, эвтрофикации и мутности в целом. Основные пики показателей 2017, 2021 годы.

В процессе практической работы выявлен главный недостаток системы Landsat, так как с 2012 года система Landsat 5 сменилась на 8 и Landsat 7 выдает искаженные данные, проследить более длительный период нет возможности, в связи с этим оценить динамику ухудшения состояния воды.

Задачи полностью выполнены, цель достигнута: проанализировано развитие процессов эвтрофикации водоема вблизи Волжской ГЭС.

Список использованных источников

1 Бенджамин, Г. Потрясающие снимки Земли со спутников / Г. Бенджамин / пер. Л. С. Патруш. – М. : Паблишер, 2018. - 284 с.

2 Акковецкий, В. И. Дешифрирование снимков. / В. И. Акковецкий – М. : Недра, 1984. - 374 с.

3 Кашкин, В. Б. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений / В. Б. Кашкин, А. И. Сухинин – М. : Логос, 2001. - 264 с.

4 Морозова, В. А. Расчет индексов для выявления и анализа характеристик водных объектов с помощью данных дистанционного зондирования

[Электронный ресурс] / В. А. Морозова // Современные проблемы территориального развития: электрон. журн. – 2019. – № 2. – 1 (дата обращения: 28.03.2022).

5 Тихомиров, О. А. Использование данных сенсора Landsat 8 (OLI) для оценки показателей мутности, цветности и содержания хлорофилла в воде Иваньковского водохранилища / О. А. Тихомиров, А. В. Бочаров, А.Б. Комиссаров, С. Д. Хижняк, П. М. Пахомов // Вестник ТвГУ. Серия «Химия». 2016. № 2. С. 230-244.

6 Сапрыгин, В. В. Изучение распределения хлорофилла-а в Азовском море по данным дистанционного зондирования Земли из космоса и результатам судовых измерений / В.В. Сапрыгин: автореф. канд. геогр. наук. Ростов-на-Дону, 2011. - 25 с.

7 Карлович, И.А. Основы геологии с элементами минералогии и петрографии / И.А Карлович. – М. : Академический проект, 2004. – 704 с.

8 Линслей, Р.К., Колер, М.А., Паулюс, Д.Л.Х. Прикладная гидрология / Пер. с англ. В.М. Бицилли [и др.]; Под ред. [и с предисл.] проф. А.Н. Бефани. Л.: Гидрометеиздат, 1962. – 759 с.