

# Использование ГИС–технологий для построения карт качества воды вдоль русла реки Амударьи

*Сычугова Л.В., Сорокин А.Г., Назарий А.М., Беглов И.Ф.  
Научно-информационный центр МКВК*

**Аннотация.** В статье представлен метод построения карт качества воды вдоль русла реки Амударья с использованием геоинформационных технологий (ГИС). Описаны основные этапы формирования картографического материала, включая сбор и обработку данных полевых измерений, выбор и применение метода интерполяции. В работе представлен метод интерполяции для создания точных и информативных карт. Предлагаемый подход позволяет создавать информативные карты, отражающие пространственное распределение показателей качества воды, а также проводить их анализ. Использование ГИС дает возможность не только эффективно визуализировать данные, но и выявлять закономерности изменений и определять потенциальные зоны экологического риска.

## Введение

Интенсивное развитие орошения и дренажных систем в бассейне Аральского моря привело к двум ключевым последствиям, существенно повлиявшим на качество речных вод: увеличению отбора пресной воды и росту сброса загрязненных возвратных вод, содержащих токсичные соли. В результате водные ресурсы реки подвергались деградации из-за поступления засоленных и загрязненных дренажных стоков с орошаемых земель, а также остатков агрохимикатов, которые вымываются в дренажные системы и смешиваются с речной водой. Помимо диффузного сельскохозяйственного загрязнения, включающего соли и химические остатки, значительный вклад в ухудшение качества воды вносят точечные источники – промышленные и муниципальные сбросы, особенно в крупных урбанизированных районах [1].

Негативное воздействие на водные экосистемы усиливается также и счет изменения гидрологического режима рек. Из-за сокращения естественного стока и увеличения водозабора нарушается баланс между пресными и солеными водами, что приводит к накоплению загрязняющих веществ. В отдельных районах наблюдается повышение концентрации тяжелых металлов, что оказывает неблагоприятное влияние на водную флору и фауну. Такие изменения требуют детального анализа и постоянного мониторинга для выработки эффективных мер по улучшению качества воды [2].

ГИС является мощным инструментом для анализа, моделирования и визуализации данных о состоянии окружающей среды, включая качество водных ресурсов. В современных условиях, когда антропогенное воздействие на природные водные объекты значительно усилилось, мониторинг качества воды приобретает особую важность. Водные ресурсы подвергаются загрязнению вследствие сельскохозяйственной деятельности, промышленных выбросов, коммунально-бытовых стоков и климатических изменений. Оперативное выявление зон загрязнения, анализ динамики изменений и прогнозирование дальнейшего развития ситуации требуют комплексного подхода, в котором ГИС играет ключевую роль.

Использование ГИС для построения карт качества воды позволяет интегрировать разнородные данные из различных источников, проводить их пространственный анализ и создавать наглядные картографические материалы. Эти карты могут включать информацию о химическом составе воды, уровне минерализации, мутности, концентрации загрязняющих веществ и других показателях. Одним из главных преимуществ ГИС является возможность автоматизированной обработки больших объёмов данных и их визуализация в удобной форме, что облегчает анализ и принятие решений в области управления водными ресурсами [3].

Важным аспектом в применении ГИС является применение различных методов интерполяции, которые позволяют заполнять пробелы между точками измерений и создавать непрерывные поверхности, отражающие состояние водных объектов. В результате формируются высокоточные карты, которые могут использоваться в научных исследованиях, экологическом мониторинге, водохозяйственном управлении и природоохранной деятельности.

В работе [4] для построения карты качества воды Ленинградской области был использован метод Кригинга, позволяющий выполнять пространственную интерполяцию значений загрязняющих веществ. В результате анализа были выявлены очаги антропогенного загрязнения, сосредоточенные преимущественно в окрестностях и на территории Санкт-Петербурга. Согласно результатам проб, в этих зонах отмечено превышение предельно допустимых концентраций тяжёлых металлов и нефтепродуктов, что свидетельствует о значительном техногенном влиянии на водные объекты региона. В [5] было отобрано 96 проб воды из реки Тигр в пределах города Багдад. Образцы были проанализированы для оценки физических и химических параметров с использованием ГИС технологий и методов пространственного анализа. Полученные аналитические результаты показали повышенные концентрации общего растворенного твердого вещества (TDS), электропроводности (EC), общей жесткости, сульфатов ( $\text{SO}_4$ ), хлоридов (Cl) и железа (Fe), что свидетельствует о деградации качества воды.

Таким образом, использование ГИС для построения карт качества воды представляет широкий спектр возможностей для анализа и оценки состояния водных объектов. В данной работе рассматриваются основные этапы создания ГИС карт качества воды, включая сбор и обработку данных, выбор метода интерполяции и создание тематических карт, предназначенных для мониторинга и управления качеством водных ресурсов.

### **Входные данные и область исследования**

Амударья – крупнейшая река в бассейне Аральского моря. В природных условиях ее воды относились к гидрокарбонатному классу с минерализацией  $0,3-0,5 \text{ г/дм}^3$ . Однако с ростом антропогенной нагрузки, увеличением водозабора и сбросов, неочищенных коллекторно-дренажных вод качество речной воды значительно ухудшилось. В настоящее время химический состав воды в Амударье во многом определяется загрязнением, поступающим с сельскохозяйственными стоками с территории Туркменистана и Узбекистана [1].

В рамках данного исследования были использованы показатели качества воды, включая концентрации следующих химических элементов и соединений:  $\text{HCO}_3$ , Cl,  $\text{SO}_4$ , Ca, Mg, Na+K, которые получены с гидропостов, расположенных вдоль русла Амударьи:

Келиф, Атамурат, Туркменабаб, Дарган-Ата, Кипчак, Саманбай и Тахиаташ (рис. 1). Период обработки данных охватывает ежемесячные данные 1991–2022 гг., что позволяет провести долговременный анализ динамики изменения химического состава воды в Амударье. В данной работе была поставлена задача проинтерполировать месячные данные в ГИС для создания наглядных карт, отражающих месячную и сезонную динамику изменения качества воды.

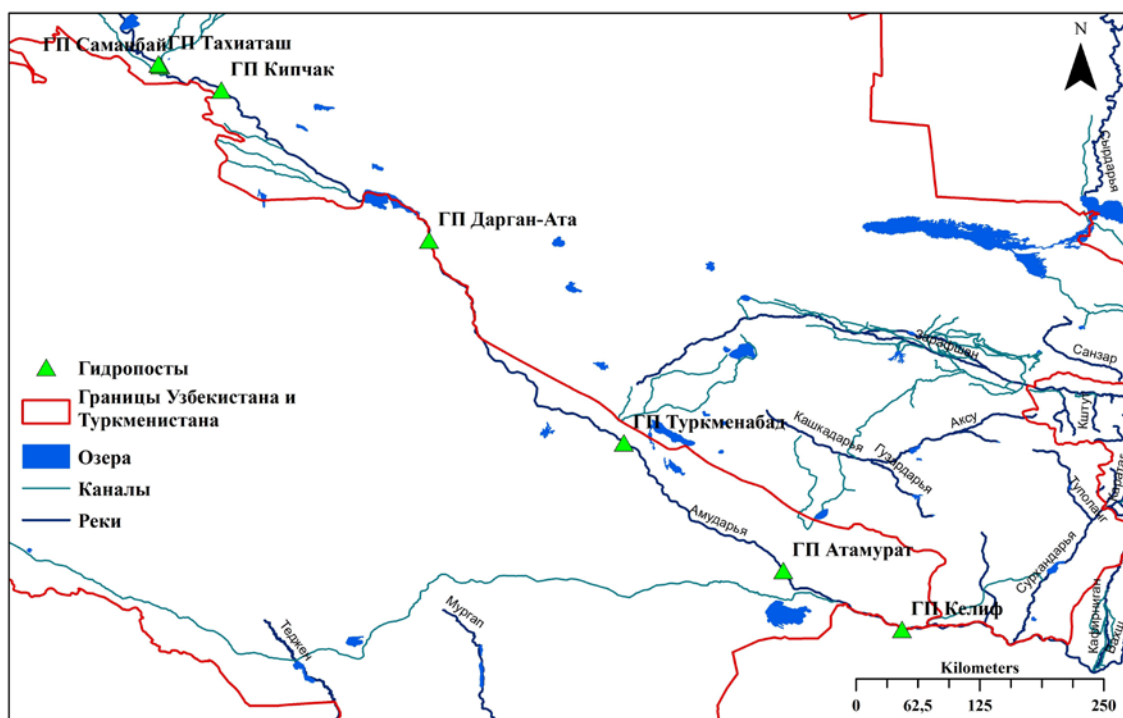


Рис. 1. Область исследования

## Метод исследования

Для создания карт качества воды вдоль русла реки Амударья применялся метод интерполяции. Этот метод позволяет прогнозировать значения в точках, где отсутствуют измеренные данные, на основе имеющихся наблюдений. Интерполяция широко используется для оценки неизвестных значений географических характеристик, таких как рельеф, количества осадков, температура, концентрация химических элементов и уровень шума [7].

В результате анализа различных методов интерполяции было принято решение использовать метод обратного взвешенного расстояния (Inverse Distance Weighting, IDW), который в нашем случае оказался наиболее подходящим для данной задачи.

Метод IDW основан на предположении, что ближайшие точки имеют более схожие характеристики, чем удаленные друг от друга. Для прогнозирования значения в неизвестной точке он использует информацию из окружающих измеренных точек, причем влияние этих значений зависит от расстояния: чем ближе измеренная точка, тем большее влияние она оказывает на конечный результат.

Принцип работы метода IDW заключается в том, что каждая измеренная точка влияет в расчет значения в неизвестной точке, причем это влияние уменьшается с увеличением расстояния. Таким образом, точки, расположенные ближе имеют больший

весовой коэффициент, чем удаленные. Весовой коэффициент измеренных значений снижается пропорционально расстоянию, что и отражает название метода – обратное взвешенное расстояние [8].

## **Результаты и их обсуждение**

Для анализа изменений качества воды по картам рассмотрим динамику химических показателей за 1991, 2001, 2011 и 2021 годы в декадном разрезе.

### ***Общий тренд качества воды***

На протяжении 30 лет наблюдаются следующие изменения:

1. Увеличение или снижение концентрации определенных веществ в зависимости от сезона и региона
2. Динамика минерализации, отражающая общий солевой состав воды
3. Влияние природных и антропогенных факторов на химический состав воды

### ***Анализ по основным показателям***

1. Кальций (Ca)
  - в 1991 г. уровень Ca был относительно стабильным, с незначительными сезонными колебаниями
  - к 2001 г. наблюдается увеличение концентрации Ca в зимний и осенний периоды, что может быть связано с изменением гидрологического режима
  - в 2011 г. уровень Ca постепенно снижается, особенно летом
  - в 2021 г. концентрация Ca остается на уровне 2011 г., но с небольшими сезонными колебаниями.
2. Хлориды (Cl)
  - в 1991 г. концентрация Cl была на минимальном уровне
  - к 2001 г. фиксируется рост Cl, особенно в летний и осенний периоды
  - в 2011 г. содержание Cl несколько стабилизировалось
  - в 2021 г. Cl демонстрирует сезонные колебания, но остается выше уровня 1991 г.
3. Гидрокарбонаты ( $\text{HCO}_3$ )
  - в 1991 г. уровень  $\text{HCO}_3$  был относительно низким и стабильным
  - в 2001 г. наблюдается повышение, особенно в зимний период
  - в 2011 г. концентрация  $\text{HCO}_3$  снижается, но остается выше, чем в 1991 г.
  - в 2021 г. наблюдается стабилизация концентрации  $\text{HCO}_3$  к средним значениям, характерным для 2001 г.
4. Магний (Mg)
  - в 1991 г. концентрация Mg была низкой, с небольшими сезонными колебаниями
  - в 2001 г. наблюдается рост в летний и осенний периоды
  - в 2011 г. уровень Mg остается высоким, но его колебания становятся менее выраженными
  - в 2021 г. отмечается небольшое снижение Mg в зимний и весенний сезоны
5. Натрий и калий (Na+K)
  - в 1991 г. уровень Na+K был стабильным
  - в 2001 г. наблюдается рост, особенно в зимний период

- в 2011 г. фиксируется небольшое снижение Na+K
  - в 2021 г. уровень Na+K остается стабильным, но выше, чем в 1991 г.
6. Сульфаты (SO<sub>4</sub>)
- в 1991 г. уровень SO<sub>4</sub> был относительно низким
  - в 2001 г. концентрация SO<sub>4</sub> возросла в летний и осенний периоды
  - в 2011 г. концентрация SO<sub>4</sub> стабилизировалась, но их уровень остался выше, чем в 1991 г.
  - в 2021 г. фиксируется незначительное снижение по сравнению с 2011 г., но уровень остается высоким
7. Минерализация
- в 1991 г. минерализация воды была на минимальном уровне
  - в 2001 г. фиксируется ее рост, особенно летом и осенью
  - в 2011 г. наблюдается пик минерализации, который затем постепенно снижается
  - в 2021 г. уровень минерализации стабилизируется, но остается выше значений 1991 г.

Одним из значимых антропогенных факторов, влияющих на химический состав воды, является сброс коллекторно-дренажных вод в реки. В данном контексте основные источники таких сбросов включают коллекторно-дренажные воды, поступающие со стороны Туркменистана, сбросы из Кашкадарьинской, Сурхандарьинской и Бухарской областей Узбекистана. Эти воды, как правило, содержат повышенные концентрации солей, минеральных вещества и агрохимикатов (удобрений, пестицидов), используемых в сельском хозяйстве. Их попадание в реку приводит к повышению минерализации воды, изменению соотношения ионов в воде, ухудшению качества водных ресурсов для питьевого и сельскохозяйственного использования.

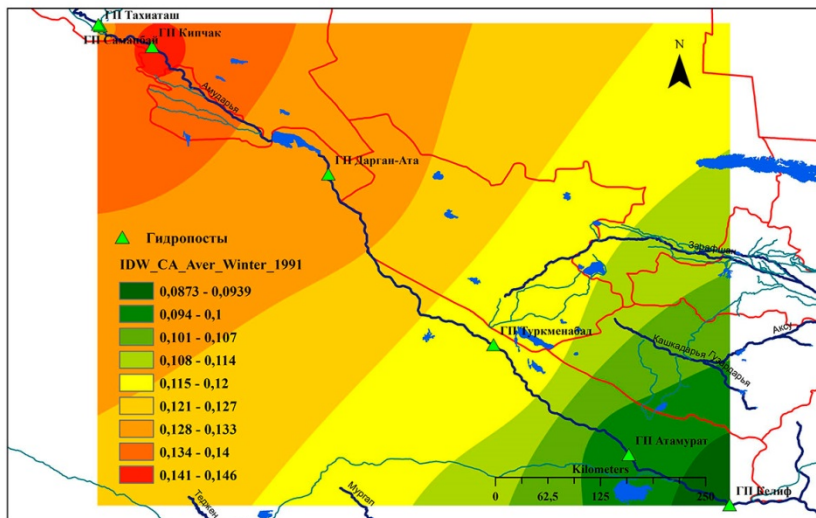
Весной наблюдается изменение минерализации воды, связанное с деятельностью Туямуюнского гидроузла. Основные причины:

1. Весенний паводок приносит с собой значительное количество растворенных и взвешенных веществ;
2. Повышенная эрозия почвенных поверхностей приводит к увеличению содержания органических и неорганических веществ в воде;
3. Регулирующее влияние гидроузла приводит к неравномерному распределению солей и химических элементов по разным участкам реки.

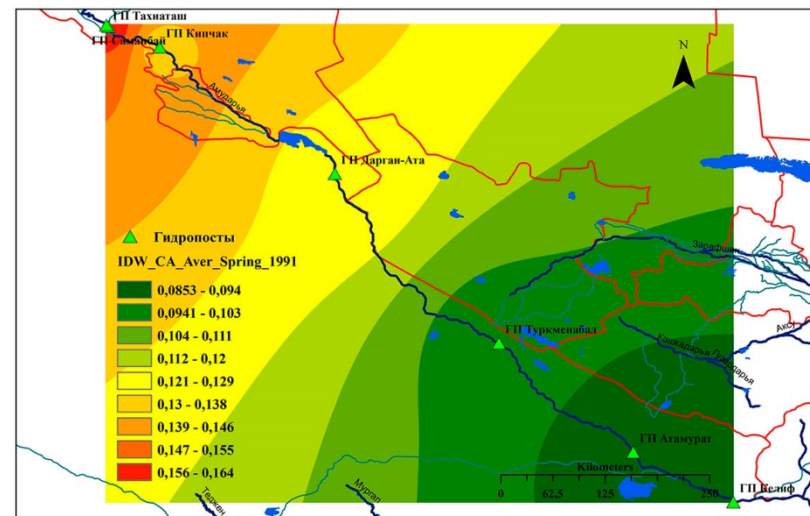
Таким образом, антропогенная нагрузка в виде сброса коллекторно-дренажных вод, а также сбросов из Кашкадарьинской, Сурхандарьинской и Бухарской областей и регулирование стока Туямуюнского гидроузла, оказывает комплексное влияние на химический состав воды, приводя к изменению минерализации, изменению ионного состава и ухудшению качества водных ресурсов.

Ниже в качестве примера представлена визуализация качества воды в бассейне Амударьи по сезонам (зима-весна-лето-осень).

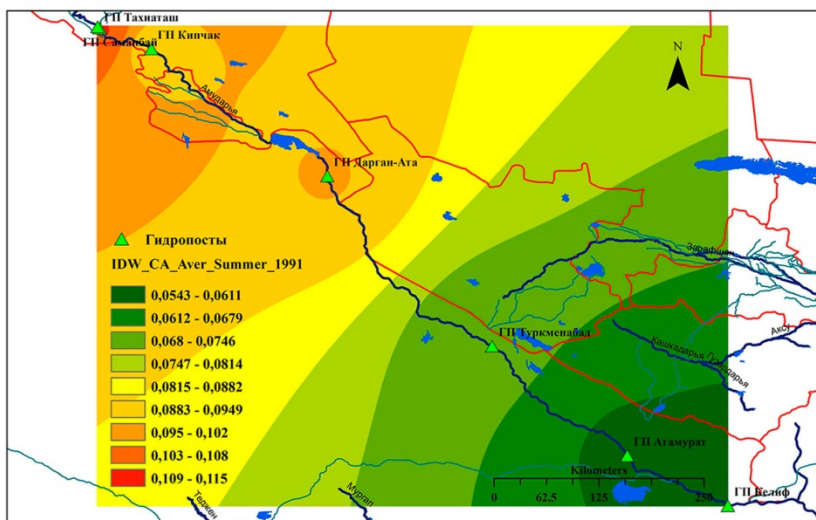
Кальций, 1991



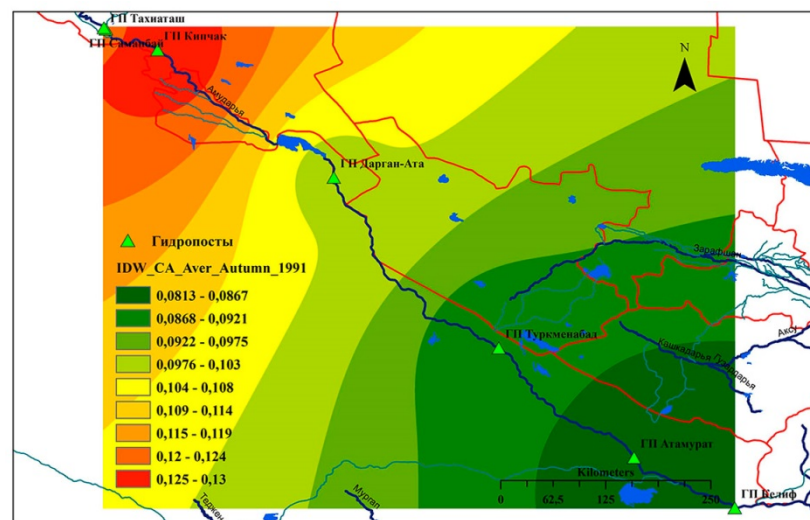
ЗИМА



ВЕСНА



ЛЕТО



ОСЕНЬ

## Реализация

Полученные ГИС-карты интегрированы в базу знаний «Качество воды в Центральной Азии» ([http://cawater-info.net/water\\_quality\\_in\\_ca/index.htm](http://cawater-info.net/water_quality_in_ca/index.htm)) (рис. 2).

Для этого с использованием технологии JSON был создан скрипт, выводящий карты для вышеуказанных соединений ( $\text{HCO}_3$ ,  $\text{Cl}$ ,  $\text{SO}_4$ ,  $\text{Ca}$ ,  $\text{Mg}$ ,  $\text{Na+K}$ , минерализация) по годам и месяцам (рис. 3) в виде уменьшенных изображений (превью). Галерея позволяет сравнивать любые данные по любым годам (рис. 4). При нажатии на превью карта выводится в полном размере (рис. 5).



Рис. 2. Внешний вид БЗ «Качество воды в Центральной Азии»



## Качество воды в бассейне реки Амударья: ГИС-карты

База знаний «Качество воды»

CA

CL

HCO<sub>3</sub>

Mg

Mineral

Na+K

SO<sub>4</sub>



### Разработка и поддержка

Научно-информационный центр МКВК

Республика Узбекистан, 100 187, г.Ташкент, массив Карасу-4, д.11А

(+998) 712 650 836, 712 650 847

sic.icwc.ca@gmail.com

sic.icwc-aral.uz, sawater-info.net

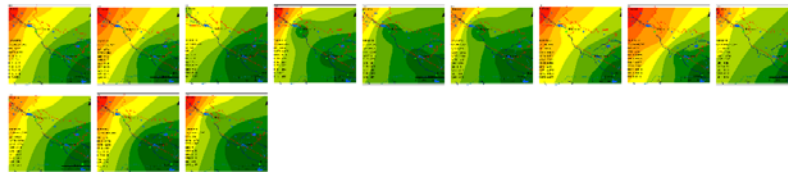
Рис. 3. Список ГИС-карт по химическим элементам и соединениям

## Качество воды в бассейне реки Амударья: ГИС-карты

База знаний «Качество воды»

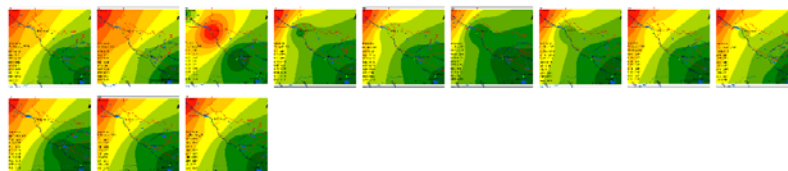
CA

1991 1992 1993 1994 1995 1996 1997 1998 1999 2000 2001 2002 2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2012 2013 2014  
2015 2016 2017 2018 2019 2020 2021 2022



CL

1991 1992 1993 1994 1995 1996 1997 1998 1999 2000 2001 2002 2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2012 2013 2014  
2015 2016 2017 2018 2019 2020 2021 2022



HCO<sub>3</sub>

1991 1992 1993 1994 1995 1996 1997 1998 1999 2000 2001 2002 2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2012 2013 2014  
2015 2016 2017 2018 2019 2020 2021 2022

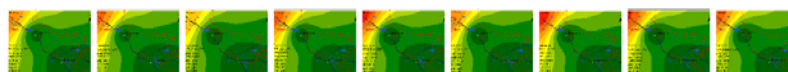
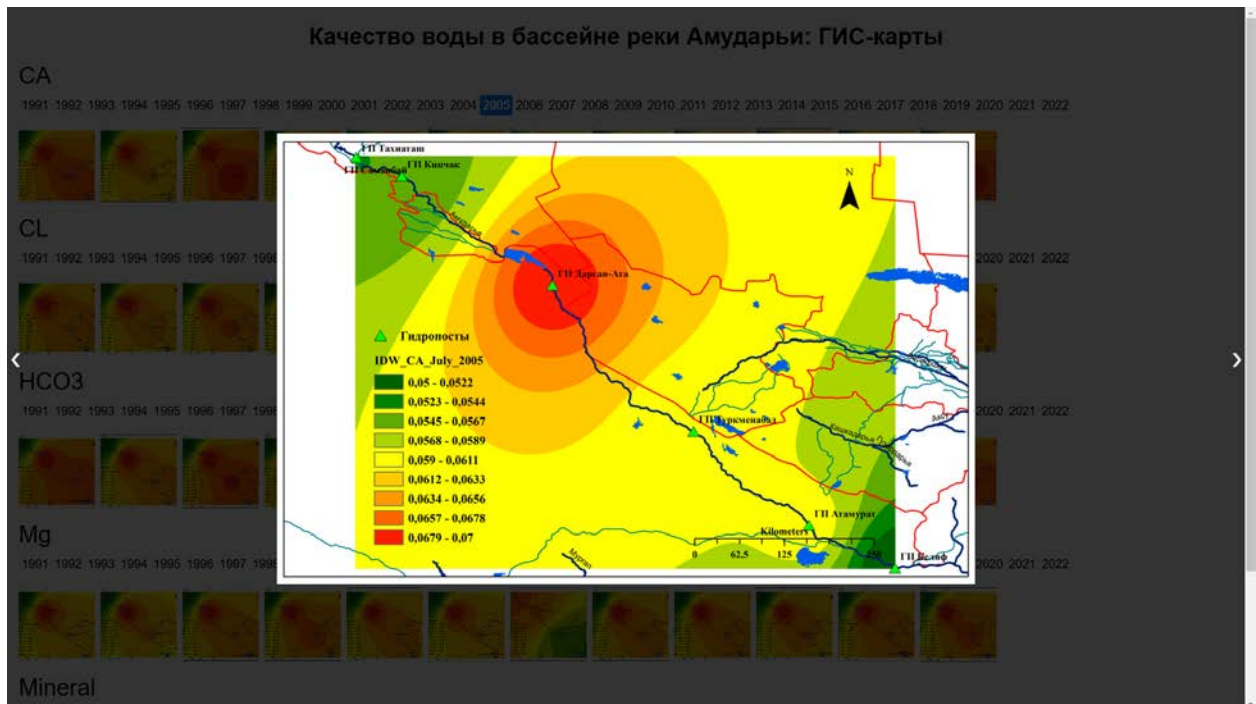


Рис. 4. Сравнение данных за различные годы





*Рис. 5. Увеличенный вид карты*

## Заключение

В данном исследовании проведен ГИС-мониторинг показателей качества воды по химическим элементам и соединениям: HCO<sub>3</sub>, Cl, SO<sub>4</sub>, Ca, Mg, Na+K, которые получены с гидропостов, расположенных вдоль русла реки Амударья: Келиф, Атамурат, Туркменадаб, Дарган-Ата, Кипчак, Саманбай и Тахиаташ. Период обработки данных охватывает ежемесячные данные 1991–2022 гг.

Анализ проводился в программном обеспечении ArcGIS с использованием метода интерполяции IDW, который позволил оценить пространственное распределение концентраций химических элементов на основе имеющихся данных.

В результате построены карты, отображающие ежемесячные и сезонные изменения качества воды.

На основе полученных ГИС-карт можно детально проанализировать динамику изменения содержания химических элементов в воде. Пространственное и временное распределение концентраций позволяет:

1. Выявить тренды изменения – определит увеличение или снижение содержания отдельных элементов в зависимости от периода наблюдения
2. Определить зоны наибольших изменений – выделить области, где концентрации веществ претерпели наиболее значительные колебания
3. Сравнить сезонные и многолетние колебания – проанализировать, как содержание химических элементов изменяются в зависимости от времени года в долгосрочной перспективе

4. Оценить влияние природных и антропогенных факторов – определить, какие участки водоема подвергаются наибольшему воздействию из-за климатических изменений, хозяйственной деятельности или других факторов
  5. Построить прогнозы – используя данные прошлых лет, спрогнозировать дальнейшее изменения качества воды и возможные риски
- Таким образом, ГИС-карты позволяют наглядно представить изменения химического состава воды, выявить ключевые закономерности и использовать полученную информацию для принятия управленческих решений.

### Список литературы

1. Качество воды в бассейнах рек Амударья и Сырдарья: Аналитический отчет / Гаппаров Б.Х., Беглов И.Ф., Назарий А.М., - НИЦ МКВК, Ташкент, 2011 г.
2. Национальный доклад о состоянии окружающей среды: Узбекистан 2023. Министерство экологии, охраны окружающей среды и изменения климата Республики Узбекистан
3. Satish Kumar Mummidivarapu, Shaik Rehana, Y.R. Satyajji Rao, Mapping and assessment of river water quality under varying hydro-climatic and pollution scenarios by integrating QUAL2K, GEFC, and GIS, Environmental Research, Volume 239, Part 1, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117250>
4. Александрович Г.В., Картографирование природных гидрологических условий и ресурсов Приневского региона, магистерская диссертация, Санкт-Петербург, 2016
5. Abbas J. Kadhem, Assessment of Water Quality in Tigris River-Iraq by Using GIS Mapping, Natural Resources, 2013, 4, 441-448, <http://dx.doi.org/10.4236/nr.2013.46054>
6. Гидрохимия: Справочник [Электронный ресурс] URL: [http://cawater-info.net/water\\_quality\\_in\\_ca/hydrochemistry.htm](http://cawater-info.net/water_quality_in_ca/hydrochemistry.htm)
7. Особенности работы инструментов группы Интерполяция растра [Электронный ресурс] URL:<https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/latest/tools/3d-analyst-toolbox/understanding-interpolation-analysis.htm>
8. Как работает метод обратных взвешенных расстояний [Электронный ресурс] URL:<https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/latest/help/analysis/geostatistical-analyst/how-inverse-distance-weighted-interpolation-works.htm>