



Научные записки НИЦ МКВК

№29

2025

Л.В. Сычугова

Методический подход построения ГИС карт по качеству воды вдоль русла реки Амударья



Методический подход построения ГИС карт по качеству воды вдоль русла реки Амударья

Сычугова Л.В.

Аннотация. В статье представлен подход к построению карт качества воды вдоль русла реки Амударья с использованием геоинформационных технологий (ГИС). Описаны ключевые этапы обработки пространственных данных: географическая привязка наблюдений, подготовка картографической базы и выбор метода интерполяции. В ходе анализа были протестированы различные методы, включая Kriging (Кригинг), Spline (Сплайн), Natural Neighbor (Естественный окрестность) и IDW (Обратного взвешенного расстояния). На основе сравнительного анализа показано, что метод IDW обеспечивает наилучшую достоверность результатов в условиях линейного размещения точек вдоль реки и недостаточности данных. Представленный подход позволил создать карты, отражающие пространственное распределение показателей качества воды и динамику их изменения.

Введение

ГИС представляют собой универсальный инструмент для сбора, хранения, анализа и визуализации пространственных данных. В области водных ресурсов ГИС технологии находят всё более широкое применение, позволяя систематизировать разнородную информацию и эффективно представлять её в виде картографических моделей. Особенно актуальным является использование ГИС при анализе качественных характеристик водных объектов, где пространственная детализация играет ключевую роль для оценки текущего состояния и выявления тенденций изменения состава и распределения показателей качества воды [1].

Одним из наиболее эффективных направлений применения ГИС является построение тематических карт качества воды, основанных на данных полевых наблюдений. Такие карты позволяют не только визуализировать распределение химических показателей вдоль русла реки, но и проводить пространственно-временной анализ, выявляя закономерности и участки с аномальными характеристиками по сравнению с наблюдаемыми данными. Использование ГИС для пространственного

анализа обеспечивает эффективное объединение и сравнение данных за разные периоды, что позволяет отслеживать динамику изменений, выявлять устойчивые тенденции и поддерживать принятие научно обоснованных решений в области водных ресурсов водными ресурсами.

Ключевым этапом при построении карт в ГИС является интерполяция — процесс определения значений показателей в промежуточных точках на основе известных значений в наблюдательных пунктах. Это особенно важно при работе с нерегулярной или ограниченной сетью наблюдений. Среди наиболее распространённых методов интерполяции в задачах анализа качества воды являются метод IDW [2] и Кригинга [3], которые позволяют получить непрерывные поверхности значений с высокой степенью достоверности.

Примеры успешного использования интерполяции встречаются в ряде региональных исследований. Так, при анализе реки Тигр в черте города Багдад было выполнено пространственное моделирование распределения основных физико-химических показателей на основе данных из 96 проб. В результате удалось визуально отразить участки с различным уровнем концентрации растворённых веществ, электропроводности и других параметров. Подобные работы демонстрируют высокую эффективность геоинформационного подхода при анализе гидрохимических данных [4]. В работе [5] 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.

Данное исследование посвящено применению ГИС технологий для построения пространственно-временных карт качества воды вдоль русла реки Амударья (территории Туркменистана и Узбекистана). Основное внимание уделено выбору и реализации метода интерполяции, организации входных данных, а также созданию карт, отражающих сезонную динамику химического состава воды. Полученные картографические материалы могут быть использованы для последующего пространственного анализа, сравнения временных и территориальных изменений, а также проведения научных и прикладных исследований.

Область исследования и входные данные

Амударья – крупнейшая река в бассейне Аральского моря. В природных условиях ее воды относились к гидрокарбонатному классу с минерализацией 0,3-0,5 г/дм³. 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 [6].

Для данного исследования были использованы показатели качества воды, включая концентрации следующих химических элементов и соединений: HCO_3 , Cl , SO_4 , Ca , Mg , $\text{Na}+\text{K}$, которые получены с гидропостов, расположенных вдоль русла Амударьи: Келиф, Атамурат, Туркменабад, 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.

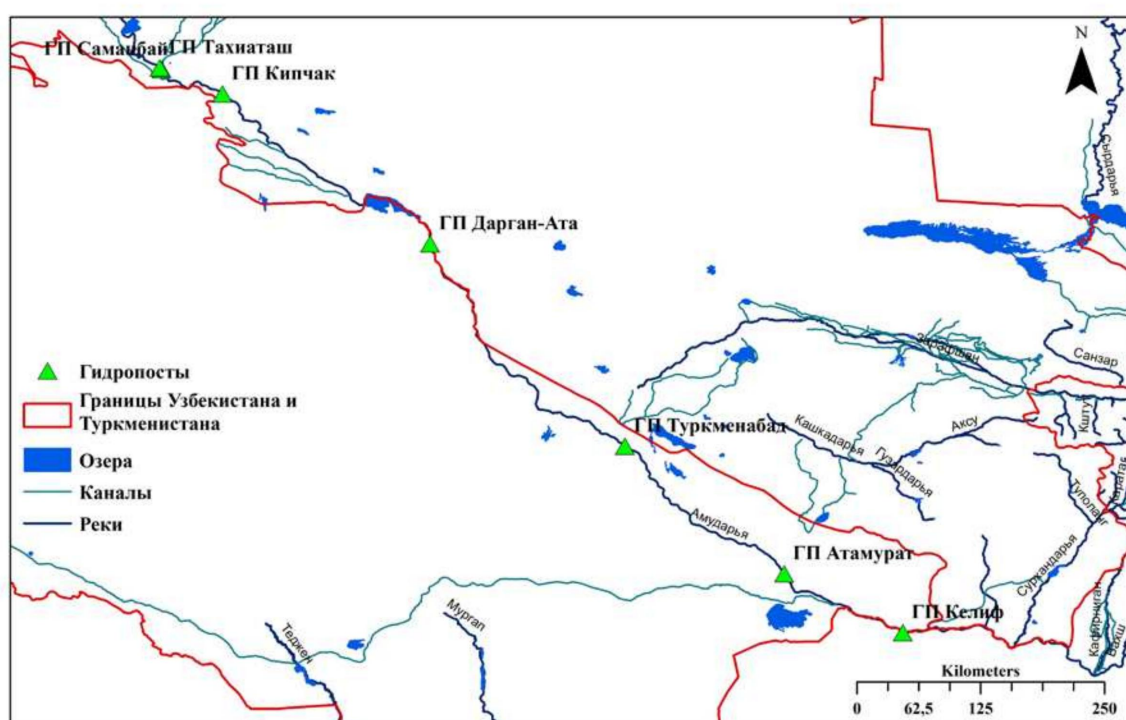


Рис. 1. Область исследования

Метод исследования

Пространственная привязка пунктов наблюдений была выполнена по географическим координатам с использованием картографической основы. Обработка и визуализация данных проводилась в среде ArcGIS. Для построения непрерывных поверхностей распределения показателей использовалась процедура пространственной интерполяции.

На предварительном этапе были рассмотрены четыре метода интерполяции, доступные в стандартных инструментах ArcGIS [7]:

1. Метод Кригинга – геостатистический метод, учитывающий пространственную автокорреляцию и обеспечивающий сглаживание данных. Подходит для сложных моделей, но требует точной настройки вариограммы и часто переусредняет значения при редкой сети наблюдений.

2. Метод Сплайнов [8] – метод сглаживающей интерполяции, создающий непрерывные плавные поверхности. Обеспечивает визуально-понятные результаты, однако может вводить артефакты при наличии резких градиентов в данных.

3. Метод IDW (Inverse Distance Weighting) – метод, предполагающий, что влияние известных точек на интерполируемое значение обратно пропорционально расстоянию до этих точек. Прост в применении, стабилен при линейной структуре данных и обеспечивает реалистичное отображение распределения значений.

4. Метод Естественной окрестность [9] – метод интерполяции, основанный на алгоритме Вороного и учитывающий ближайших соседей по площади. Он даёт гладкие, локально адаптивные поверхности и минимизирует переоценку и недооценку значений, особенно в областях с неравномерным распределением точек. Однако его использование ограничено невозможностью экстраполяции за пределами внешнего контура точек.

После сравнительного анализа результатов (по визуальной читаемости, отсутствию резких артефактов, воспроизводимости тенденций и соотношению с реальными данными) было принято решение использовать метод IDW. Он продемонстрировал более стабильную и интерпретируемую картину распределения значений, особенно с учётом ограниченного количества наблюдательных точек и линейной протяжённости.

Результаты

Результаты данного исследования подтверждают высокую эффективность использования ГИС для пространственного анализа показателей качества воды вдоль русла рек. В частности, применённые инструменты ArcGIS позволили не только структурировать и отобразить многолетние данные, но и выполнить сравнение различных методов интерполяции для построения непрерывных пространственных поверхностей.

Географическая привязка данных. Все гидропосты, где проводились замеры, были точно привязаны к координатам в системе WGS 84. На основе этих точек была создана пространственная база, в которую интегрированы данные по годам, сезонам и месяцам. Использование инструментов XY Table to Point [10] и Join by Attributes [11] позволило автоматически объединить данные в единую ГИС-модель.

Анализ методов интерполяции. Для генерации непрерывных пространственных поверхностей по дискретным данным были апробированы следующие методы интерполяции:

1. *Метод Кригинга.* Несмотря на широкую распространённость в геостатистике, метод показал неудовлетворительные результаты в условиях линейного размещения точек вдоль русла реки. Метод оказался чувствительным к параметрам модели и требовал сложной настройки функции пространственного сглаживания, а также показал низкую устойчивость при недостаточной плотности наблюдательных точек. В результате на некоторых участках модели формировались сглаженные поверхности, не отражающие реальных колебаний.

2. *Метод Сплайнов.* Метод формирует чрезмерно сглаженные поверхности и демонстрирует высокую чувствительность к аномально высоким или низким значениям в выборке, что может приводить к искажению интерполяционного результата в их окрестности. В интерполированных поверхностях между удалёнными точками наблюдения возникали артефакты — искусственные перепады значений, выраженные в виде локальных максимумов и минимумов, не подтверждённых фактическими измерениями.

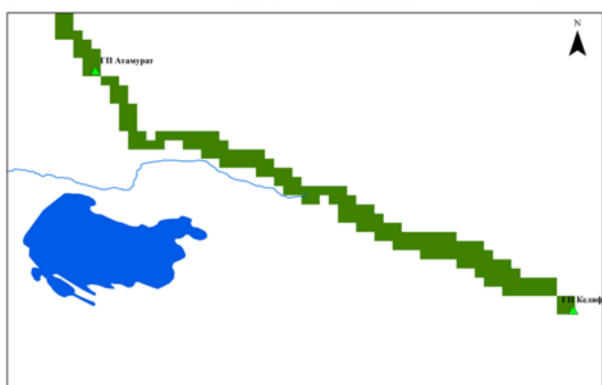
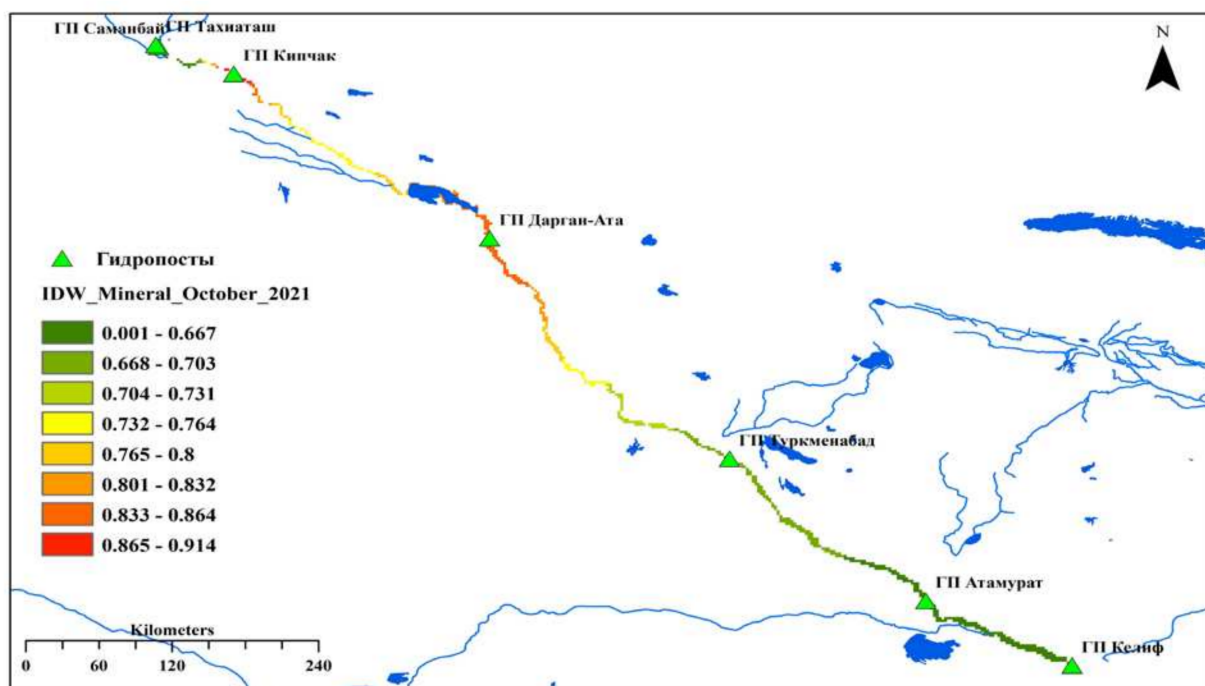
3. *Метод Естественной окрестности.* Этот метод показал лучшие результаты, чем Кригинг и Сплайн особенно в зонах плотного расположения гидропостов. Он обеспечивал аккуратную локальную интерполяцию и не создавал резких перепадов значений. Однако основным недостатком этого метода заключается в том, что он не может предсказать значения за пределами области, охваченной исходными точками. То есть

интерполяция работает только внутри контура, образованного точками наблюдения, и не даёт результатов вне этой.

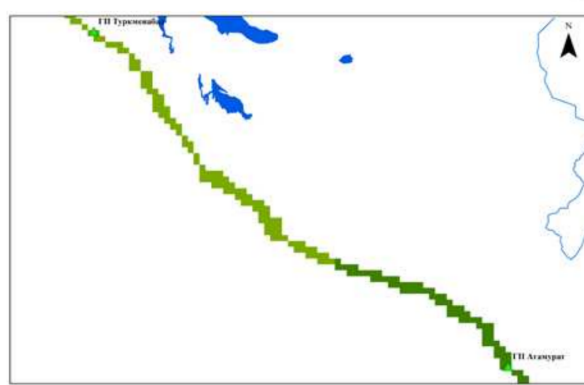
4. *Метод IDW.* Метод продемонстрировал наилучшую пригодность для условий анализа речных систем, где наблюдательные точки распределены вдоль одной оси. Алгоритм базируется на предположении, что влияние каждой точки измерения обратно пропорционально расстоянию до точки интерполяции: чем ближе измерение, тем выше его вес [2]. Это позволяет сохранять локальные особенности данных, не допуская чрезмерного сглаживания или появления неестественных перепадов значений. Особенно важно, что IDW стабильно работает при негустой и нерегулярной сети наблюдений, когда другие методы теряют точность или формируют артефакты. Он хорошо адаптируется к линейным структурам, таким как русло реки. Кроме того, метод не требует сложной настройки параметров модели, в отличие от Кригинга, и не чувствителен к аномальным значениям, как это наблюдается у Сплайна. Это делает его наиболее надёжным для пространственного анализа и визуализации данных качества воды, особенно в условиях ограниченного количества измерений. Таким образом, IDW обеспечивает сбалансированное соотношение между точностью, визуальной интерпретируемостью и простотой применения, что делает его наиболее подходящим для построения тематических карт распределения веществ в русловых системах.

Построение тематических слоёв. На основе метода IDW были построены карты распределения по каждому химическому параметру: минерализация, сульфаты, хлориды, кальций и др. Карты отображались с использованием градиентной цветовой шкалы: от зелёного (лучшие значения показателя) к жёлтому, оранжевому и красному (худшие значения), что позволяет интуитивно воспринимать уровни загрязнения и аномалий в распределении параметров качества воды (рис. 2,3). Для каждой карты шкала формируется индивидуально с учётом входных данных, использованных при интерполяции методом IDW. Такой подход обеспечивает отображение изменения значений минерализации от минимальных к максимальным в рамках именно того набора исходных измерений, который был использован для построения конкретной карты.

На основании представленных данных шкалы IDW за октябрь 2021 г., можно отметить, что в створах Келиф, Атамурат и Тахиаташ зафиксированы минимальные значения минерализации. В районе створа Дарган-Ата наблюдается заметное увеличение минерализации, а в створе Саманбай показатели достигают максимальных значений, отражая наибольшее содержание растворённых солей по рассматриваемому участку реки.



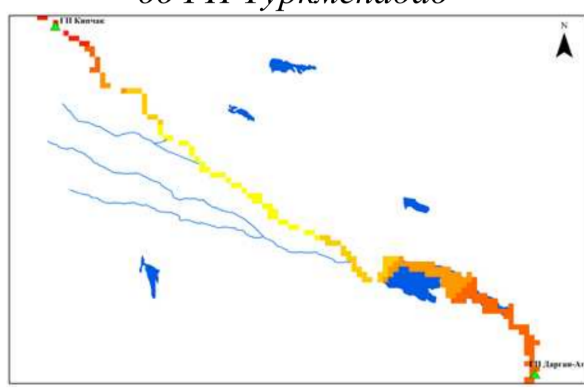
*Участок от ГП Келиф
до ГП Атамурат*



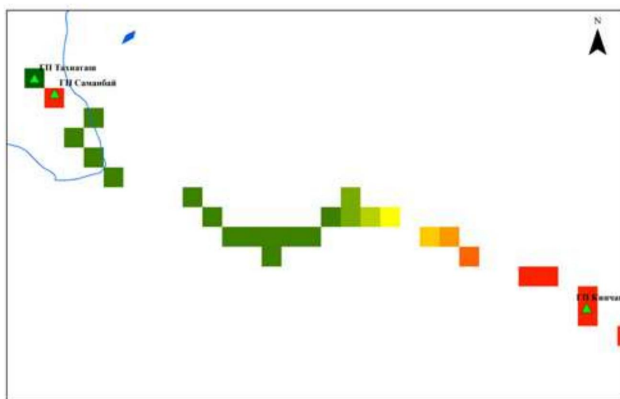
*Участок от ГП Атамурат
до ГП Туркменабад*



*Участок от ГП Туркменабад
до ГП Дарган-Ата*



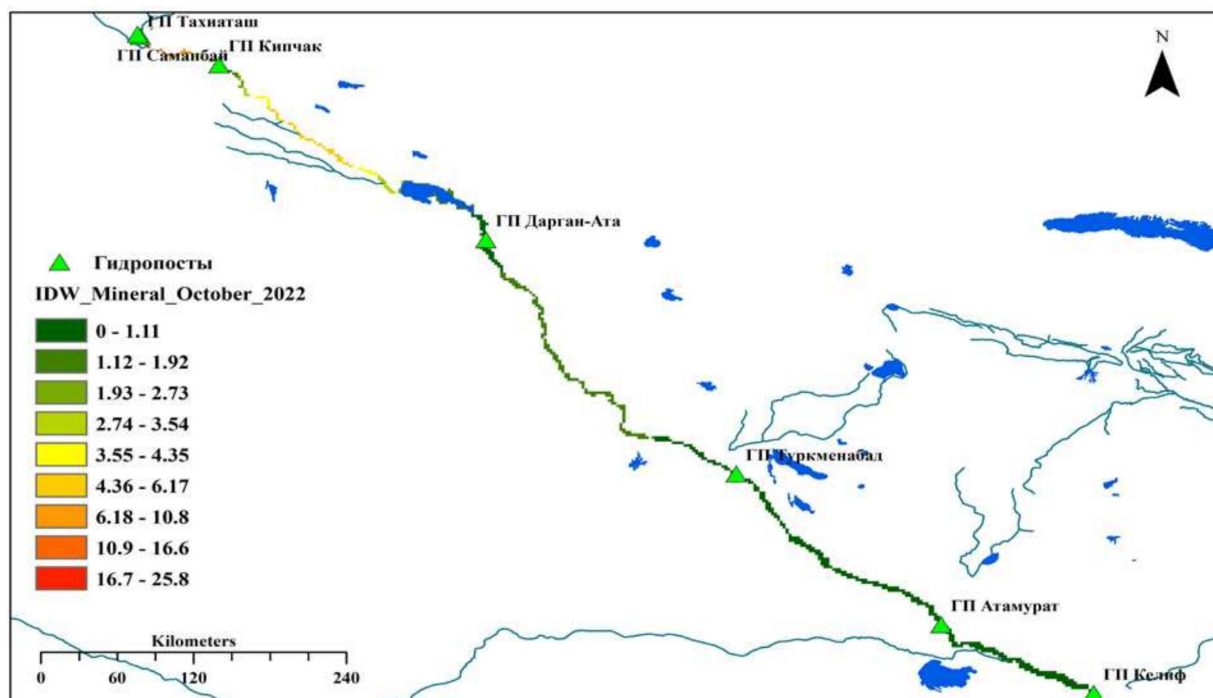
*Участок от ГП Дарган-Ата
до ГП Кипчак*

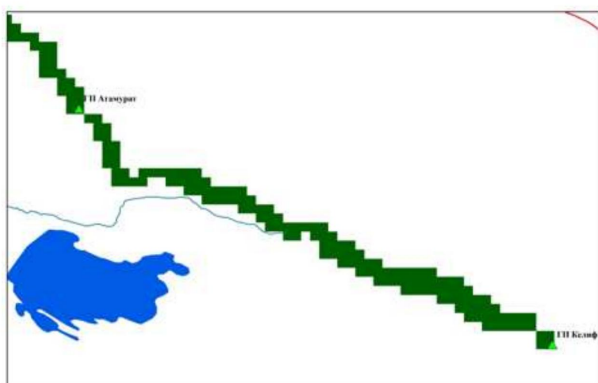


Участок от ГП Кипчак
до ГП Тахиаташ

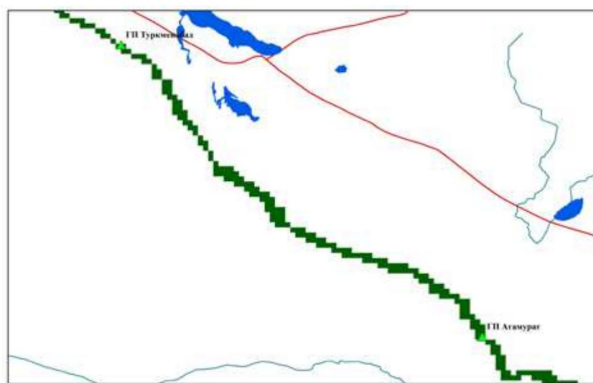
Рис. 2. Карта изменения минерализации по данным интерполяции
методом IDW, октябрь 2021

По результатам шкалы IDW за октябрь 2022 г. отмечается улучшение ситуации, на участке реки от створа Келиф до створа Дарган-Ата зафиксированы минимальные значения минерализации. Однако в районе створа Саманбай сохраняются такие же высокие показатели, как и по данным карт за 2021 г.

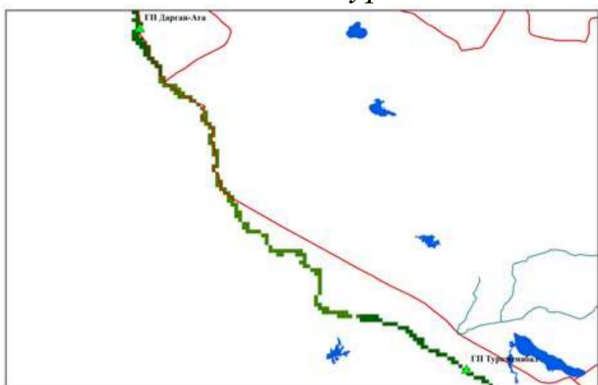




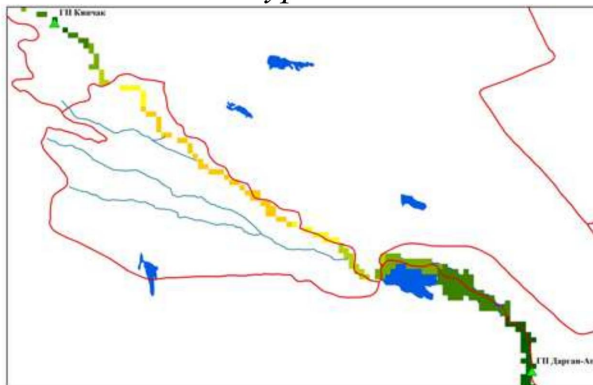
*Участок от ГП Келиф
до ГП Атамурат*



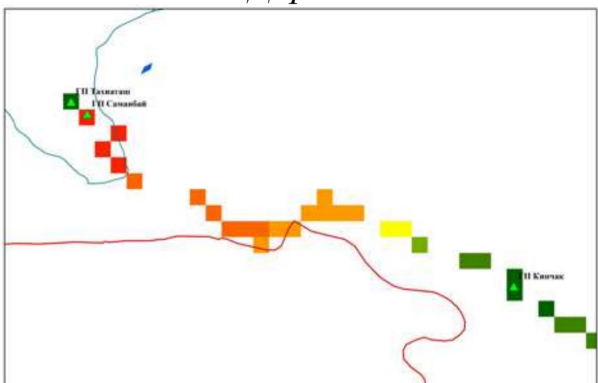
*Участок от ГП Атамурат
до ГП Туркменабад*



*Участок от ГП Туркменабад
до ГП Дарган-Ата*



*Участок от ГП Дарган-Ата
до ГП Кипчак*



*Участок от ГП Кипчак
до ГП Тахияташ*

*Рис. 3. Карта изменения минерализации по данным интерполяции
методом IDW, октябрь 2022*

В работе [12] исследован гидрохимический состав воды р. Амударья. Показано, что в верховьях у створа Келиф при увеличении минерализации с 0,42 до 0,75 г/л содержание сульфат-ионов возрастает с 0,04 до 0,09 г/л, а ионов магния — с 0,16 до 0,27 г/л; вода имеет хлоридно-сульфатный кальциево-магниевый состав (ХС-КМ). В низовьях, у створа Саманбай,

при росте минерализации с 1,71 до 2,3 г/л сульфат-ионы увеличиваются с 0,37 до 0,49 г/л, а ионы кальция — с 0,08 до 0,14 г/л; преобладает хлоридно-сульфатный натриево-магниево-кальциевый состав (ХС-НМК).

Таким образом, по мере течения реки химический тип воды меняется с ХС-КМ на ХС-НМК, а многолетние наблюдения фиксируют устойчивый рост минерализации, связанный с большими водозаборами, снижением водоносности и массовым сбросом коллекторных вод вдоль всего русла.

Заключение

Проведённое исследование подтверждает высокую эффективность применения ГИС для пространственного анализа и картографирования качественных характеристик водных объектов. Использование ГИС позволяет не только наглядно представить пространственное распределение химических показателей, но и проводить сравнительный анализ изменений во времени, выявлять участки с аномальными значениями и отслеживать динамику экологического состояния водной системы.

Особое внимание в исследовании уделяли выбору метода интерполяции, поскольку именно от него зависит степень точности и достоверности получаемых карт. Из всех протестированных подходов наилучшие результаты продемонстрировал метод IDW. Он оказался наиболее устойчивым к ограничениям, связанным с линейной структурой исследуемого объекта и нерегулярным расположением точек наблюдений. Метод IDW обеспечивает реалистичное отображение пространственных градиентов без искусственного сглаживания или искажения значений, что особенно важно для анализа данных.

Сравнительный анализ карт IDW и данных гидрохимического исследования [12] показывает их согласованность, минимальные значения минерализации отмечаются в верховьях (створы Келиф, Атамурат), тогда как в низовьях (створ Саманбай) фиксируются максимальные концентрации растворённых солей. Таким образом, оба источника данных подтверждают общую закономерность низкую минерализацию в верховьях, резкий рост по мере течения к низовьям и устойчиво высокие показатели в районе Саманбая.

Таким образом, предложенный подход, основанный на использовании ГИС и метода IDW, представляет собой надёжный и воспроизводимый инструмент для пространственного анализа качества воды в русловых системах. Он может быть рекомендован для применения в экологическом мониторинге, управлении водными ресурсами и других

смежных областях, требующих высокой степени пространственной детализации и визуализации данных.

Список литературы

1. 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>
2. Электронный ресурс - <https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/latest/help/analysis/geostatistical-analyst/how-inverse-distance-weighted-interpolation-works.htm>
3. Электронный ресурс - <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/latest/tools/3d-analyst-toolbox/how-kriging-works.htm>
4. 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>
5. Александрович Г.В., Картографирование природных гидрологических условий и ресурсов Приневского региона, магистерская диссертация, Санкт-Петербург, 2016
6. Аналитический отчет «Качество воды в бассейнах рек Амударья и Сырдарья», НИЦ МКВК, ЕЭК ООН, РЭЦ ЦА, Ташкент 2011 г.
7. Электронный ресурс - <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/latest/tools/3d-analyst-toolbox/comparing-interpolation-methods.htm>
8. Электронный ресурс - <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/latest/tools/3d-analyst-toolbox/how-spline-works.htm>
9. Электронный ресурс - <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/latest/tools/3d-analyst-toolbox/how-natural-neighbor-works.htm>
10. Электронный ресурс - <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/latest/manage-data/tables/adding-an-ascii-or-text-file-table.htm>

11.Электронный ресурс -

<https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/latest/manage-data/tables/about-joining-and-relating-tables.htm>

12.Рахимова М.Н., Долидудко А.И., Исследование и оценка

гидрохимических особенностей воды реки Амударья, «Экономика и Социум», № 6 (133), 2025