

**АННОТАЦИЯ**  
**диссертационной работы на соискание степени доктора**  
**философии (PhD) по специальности 6D071600 – «Приборостроение»**  
**Базарбай Лашин на тему «Разработка мультисенсорной системы**  
**контроля показателей воды»**

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время влияние антропогенных и природных экологических факторов на водные ресурсы усиливается. Эти факторы оказывают прямое воздействие на физические, химические и биологические свойства водоёмов, приводя к снижению качества воды и нарушению экосистемного равновесия. Подобные процессы становятся одной из актуальных проблем в области водной безопасности и охраны окружающей среды.

**Вода** — ключевой природный ресурс, играющий решающую роль в поддержании жизни живых организмов и биологического равновесия. Она является не только источником жизни, но и одним из главных экологических факторов, обеспечивающих стабильность и функциональную целостность наземных и подземных экосистем.

В связи с этим, **постоянный и системный мониторинг качества воды** рассматривается как одна из современных научно-технических задач. Он представляет собой важный и стратегически значимый инструмент обеспечения экологической безопасности. Однако оценка качества воды — это сложный и многогранный процесс, сопряжённый с рядом трудностей. Качественные характеристики воды постоянно изменяются под воздействием различных природных и антропогенных факторов. Для объективной оценки этих изменений и точного понимания динамики экосистемных процессов необходимо применять специальные аналитические методы комплексного анализа состава воды. Такие методы позволяют охарактеризовать экологическое состояние воды на основе измерения её физических (температура, мутность), химических (рН, электропроводность, окислительно-восстановительный потенциал) и биологических (органические вещества, микрофлора) показателей.

На сегодняшний день в мониторинге качества воды широко применяются **традиционные лабораторные методы**, основанные на анализе проб, отобранных из водоёмов. Эти методы позволяют с высокой точностью определять множество параметров и соответствуют нормативным требованиям. Однако они имеют ряд существенных ограничений: временные задержки в процессе контроля, отсутствие непрерывного мониторинга, сложности при оперативной обработке данных и пространственные ограничения. Всё это затрудняет объективную оценку состояния водной среды в реальном времени и принятие своевременных решений.

Кроме того, **краткосрочные лабораторные методы** далеко не всегда позволяют своевременно фиксировать динамические изменения в качестве воды. Одной из причин такой сложности является **отсутствие комплексных систем**, способных одновременно и в режиме реального времени измерять пять важнейших параметров воды: рН, мутность, электропроводность, температуру и окислительно-восстановительный потенциал.

В связи с этим возникает необходимость в разработке современных измерительных систем, основанных на **технологиях Интернета вещей (IoT)**, способных обеспечивать непрерывный и долговременный мониторинг в режиме реального времени. Разработанная **мультисенсорная система** позволяет одновременно измерять пять ключевых показателей качества воды — температуру, мутность, рН, окислительно-восстановительный потенциал и электропроводность, предоставляя комплексную и достоверную информацию о состоянии экосистемы. Система автоматически передаёт собранные данные через микроконтроллер **ESP32** по Wi-Fi на облачную платформу **Blynk**, обеспечивая дистанционный мониторинг, визуализацию и оперативный анализ данных.

Результаты **корреляционно-регрессионного анализа** позволили выявить статистически значимые взаимосвязи между основными параметрами качества воды. Анализ показал, что температура существенно влияет на другие показатели, что обосновывает её использование в качестве ключевого предиктора при построении моделей прогнозирования качества воды.

Средняя относительная погрешность измерений **не превышала 3%**, что свидетельствует о высокой надёжности полученных данных. При уровне значимости  $p < 0,05$  коэффициенты корреляции определялись в пределах от  $r = 0,3238$  до  $r = 0,6999$ , что указывает на статистически значимую и неслучайную связь между физическими и качественными характеристиками воды.

С повышением температуры наблюдалось снижение значений кислотности, электропроводности и мутности; коэффициенты корреляции для этих связей достигали  $r = -0,889$  до  $-0,998$ . Также учтено влияние **сезонных факторов**: повышение температуры в разные сезоны сопровождалось увеличением окислительно-восстановительного потенциала, что подтверждается осенними ( $r = 0,940$ ) и весенними ( $r = 0,908$ ) значениями.

Полученные данные доказывают наличие тесной статистической взаимосвязи между физическими параметрами воды и её качественными показателями. Эта взаимозависимость служит важной научной основой для моделирования и прогнозирования состояния водных экосистем. С учётом вышеизложенного, **разработка и внедрение мультисенсорной системы**

**для мониторинга ключевых показателей качества воды в режиме реального времени** представляет собой актуальное и перспективное научно-техническое направление, соответствующее современным требованиям.

Таким образом, создание предлагаемой мультисенсорной системы для контроля показателей воды является **современным научно-техническим решением**, направленным на формирование надёжных средств комплексного мониторинга качества воды. Эта инициатива рассматривается как стратегически значимое научное направление, способствующее модернизации инфраструктуры экологического мониторинга и оперативному реагированию на изменения в окружающей среде.

**Степень разработанности темы исследования.** Проблема контроля качества воды является одним из приоритетных направлений современных научных исследований в области экологии, гидрологии и инженерных систем мониторинга. Вопросы оценки состояния водных ресурсов рассматриваются с точки зрения обеспечения экологической безопасности, охраны здоровья населения и рационального использования природных ресурсов. В связи с этим в научной литературе широко представлены исследования, посвященные разработке методов и технических средств контроля параметров водной среды.

В традиционных подходах к контролю качества воды основное внимание уделяется лабораторным методам анализа, позволяющим с высокой точностью определять физико-химические и биологические показатели воды. Такие методы подробно рассмотрены в работах отечественных и зарубежных исследователей, занимающихся вопросами аналитического контроля водных сред. Однако применение лабораторных методов требует значительных временных затрат, специального оборудования и не всегда позволяет осуществлять оперативный мониторинг изменений параметров водной среды.

В последние годы значительное внимание уделяется разработке автоматизированных систем мониторинга качества воды, основанных на применении сенсорных технологий. В научных публикациях рассматриваются различные типы датчиков для измерения таких показателей, как рН, температура, электропроводность, мутность, растворенный кислород и окислительно-восстановительный потенциал. Применение сенсорных технологий позволяет проводить измерения непосредственно в месте наблюдения и получать данные в режиме реального времени.

Особое место в современных исследованиях занимают мультисенсорные системы контроля, которые обеспечивают одновременное измерение нескольких параметров водной среды. Такие

системы позволяют комплексно оценивать состояние воды и выявлять взаимосвязи между различными показателями качества. В научных работах также рассматриваются методы обработки измерительных данных, включая статистический анализ, корреляционные исследования, регрессионное моделирование и применение методов машинного обучения для прогнозирования изменений водной среды.

Вместе с тем анализ существующих решений показывает, что многие из разработанных систем имеют высокую стоимость, сложную архитектуру и ограниченные возможности масштабирования и интеграции в системы экологического мониторинга. Кроме того, остаются недостаточно исследованными вопросы комплексной обработки данных, получаемых от нескольких сенсоров, и повышения точности оценки состояния водной среды на основе мультисенсорных измерений.

Таким образом, несмотря на значительное количество научных исследований в области мониторинга качества воды, задача разработки эффективных, доступных и надежных мультисенсорных систем контроля параметров водной среды остается актуальной. Это определяет необходимость дальнейших исследований, направленных на совершенствование методов измерения, обработки и анализа данных, получаемых в системах мультисенсорного мониторинга качества воды.

**Объектом исследования** Мультисенсорная измерительная система, основанная на технологии Интернета вещей (IoT), предназначенная для мониторинга физических и химических параметров водных экосистем в режиме реального времени.

**Предметом исследования** методы и средства мультисенсорного контроля параметров водной среды, а также процессы измерения, обработки и анализа данных, получаемых при мониторинге основных показателей качества воды. В рамках исследования рассматриваются принципы построения мультисенсорной системы, обеспечивающей одновременное измерение таких параметров, как температура, кислотность (pH), мутность, электропроводность и окислительно-восстановительный потенциал, а также методы статистической обработки и интерпретации полученных измерительных данных для комплексной оценки состояния водной среды.

**Целью диссертационной работы** является разработка мультисенсорной системы, основанной на физических методах аналитического контроля качества воды и предназначенной для измерения ряда количественных показателей.

**Задачи исследования.** С учетом поставленной цели выделены

научные задачи, требующие решения в рамках диссертационной работы:

- критический анализ методов, применяемых для измерения пяти показателей качества воды (температура, мутность по формазину, кислотность, электропроводность и окислительно-восстановительный потенциал);
- разработка мультисенсорной системы для контроля качества воды с учётом подбора датчиков, предназначенных для измерения физико-химических параметров воды;
- проектирование аппаратной и программной архитектуры мультисенсорной системы;
- корреляционный и регрессионный анализ взаимосвязей между показателями качества воды на основе полученных экспериментальных данных;
- исследование влияния температуры на показатели качества воды и построение линейной регрессионной модели для их описания.

**Методы исследования.** Мультисенсорная измерительная система, основанная на технологии Интернета вещей (IoT), предназначенная для мониторинга физических и химических параметров водных экосистем в режиме реального времени.

#### **Научная новизна:**

1. Впервые была предложена новая мультисенсорная система на основе физических датчиков, способная одновременно измерять пять ключевых показателей качества воды — температуру, кислотность, мутность по формазину, электропроводность и окислительно-восстановительный потенциал. В отличие от ранее существовавших систем, охватывавших лишь три–четыре показателя, данная система расширяет возможности комплексного мониторинга качества воды и позволяет преодолеть методологические ограничения предыдущих подходов.
2. В результате исследования установлено значительное влияние температуры воды на другие показатели. Экспериментальные испытания доказали, что при повышении температуры наблюдается снижение кислотности, электропроводности и мутности по формазину, тогда как окислительно-восстановительный потенциал возрастает.
3. В рамках исследования было использовано более 10 000 измерений, что обеспечило высокую статистическую надёжность и устойчивость регрессионной модели. Все  $p$ -значения коэффициентов моделей оказались ниже 0,05, что свидетельствует о высокой прогностической способности полученных результатов и их статистической значимости.

**Теоретическая значимость работы** заключается в развитии научно-методических основ мониторинга качества воды на основе мультисенсорных технологий. В работе обоснованы подходы к построению мультисенсорной системы контроля параметров водной среды и предложены методы статистической обработки измерительных данных для комплексной оценки состояния воды.

#### **Практическая значимость работы:**

- по результатам экспериментальных работ разработанная мультисенсорная система на основе технологий Интернета вещей (IoT) обеспечивает комплексный контроль качества воды в режиме реального времени;
- предполагается широкое внедрение научно-исследовательских результатов в образовательных учреждениях, экосистемных исследованиях, на объектах промышленного и коммунального водоснабжения, а также в сельском хозяйстве и на бытовом уровне с целью мониторинга качества воды;
- разработанные методические и технические решения адаптированы для применения в области комплексного контроля качества воды и представляют актуальность для эффективного использования в практической деятельности профильных организаций и учреждений;
- автоматическая передача полученных данных на облачный сервер с последующей визуализацией обеспечивает возможность дистанционного управления системой и оперативного анализа;
- рекомендации по практическому применению мультисенсорной системы контроля показателей воды.

#### **Выводы, предлагаемые к защите:**

1. Разработана мультисенсорная система для непрерывного измерения пяти основных показателей качества воды: температуры, кислотности (рН), мутности по формазину, электропроводности и окислительно-восстановительного потенциала (ORP). Эффективность и надежность разработанной системы подтверждены результатами экспериментальных исследований, что свидетельствует о ее пригодности для практического применения.
2. Проведенный корреляционно-регрессионный анализ позволил выявить статистически значимые взаимосвязи между параметрами качества воды. Результаты исследования показали, что температура оказывает наибольшее влияние на остальные показатели, что дает основания рассматривать ее в качестве основного предиктора при моделировании качества воды.

3. Относительная погрешность измерений не превышала 3 %, что подтверждает достоверность полученных данных. На основе проведенных измерений установлена статистически значимая и неслучайная связь между качественными показателями воды и ее физическими характеристиками. Коэффициенты корреляции находились в диапазоне от  $r = 0,3238$  до  $r = 0,6999$  при уровне значимости  $p < 0,05$ . Это свидетельствует о существенном влиянии физических параметров на качественные характеристики водной среды.

4. Также установлено, что повышение температуры сопровождается снижением показателей кислотности, электропроводности и мутности, при этом коэффициенты корреляции варьируются в диапазоне от  $r = -0,889$  до  $r = -0,998$ . Кроме того, экспериментально подтверждено, что с учетом сезонных факторов повышение температуры приводит к увеличению корреляционной зависимости по показателю окислительно-восстановительного потенциала, где коэффициенты корреляции составили  $r_{осень} = 0,940$  и  $r_{весна} = 0,908$ .

#### **Степень достоверности результатов работы**

Достоверность результатов исследования обеспечена применением современных методов измерений, статистической обработки данных и проведением экспериментальных исследований. Точность разработанной системы подтверждается тем, что относительная погрешность измерений не превышает 3 %, а статистически значимые зависимости между параметрами качества воды установлены на основе корреляционно-регрессионного анализа при уровне значимости  $p < 0,05$ .

**Апробация результатов исследования.** По результатам выполненных научных исследований диссертационной работы опубликованы 15 научных трудов, из них, 3 статьи, из них: 1 статья — в журнале, индексируемом в базе Scopus (Q3, перцентиль 45), 2 статьи — в зарубежных изданиях, входящих в международные реферативные базы данных, 4 статьи опубликованы в научном издании, рекомендованном Комитетом по контролю в сфере образования и науки МНиВО РК, 7 материалов международных научно-практических конференций, а также получены 1 патента РК на полезную модель.