

УДК 504.064.36

DOI 10.52167/1609-1817-2026-143-2-321-330

А.А. Савостин, Ю.В. Герасимова, С.И. Латыпов, А.В. Проселков*, Д.Б. Узбеков

НАО «Северо-Казахстанский университет им. М.Козыбаева»

E-mail: proselkov96@mail.ru

МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ EDGE COMPUTING и LORAWAN

Аннотация. В статье представлена архитектура автоматизированной системы мониторинга качества воды на основе Интернета вещей (IoT) и периферийных вычислений (Edge Computing). Разработана масштабируемая аппаратно-программная платформа для сбора, передачи (LoRaWAN) и визуализации данных в реальном времени (стек TIG). Использование микроконтроллера RISC-V для первичной обработки данных (фильтрация, термокомпенсация) позволило снизить объем сетевого трафика в 8 раз и уменьшить инструментальную погрешность до $\pm 2-3\%$. Оптимизация энергопотребления (до 435 мкА) обеспечивает автономность измерительных узлов до 260 суток. Предложенное вендорнезависимое решение адаптировано для удаленных объектов и интеграции в системы «Smart City».

Ключевые слова: Интернет вещей, мониторинг водных ресурсов, Edge Computing, LoRaWAN, RISC-V, экологическая безопасность.

ВВЕДЕНИЕ

Рост антропогенной нагрузки требует перехода от высокоточных, но дискретных лабораторных исследований к непрерывному контролю качества водных ресурсов. Современные технологии Интернета вещей (IoT) и периферийных вычислений (Edge Computing) позволяют решать эту задачу, выполняя первичную обработку данных непосредственно на измерительных узлах, что снижает нагрузку на каналы связи и повышает оперативность системы. Несмотря на развитие этих технологий, большинство существующих решений ограничено регистрацией разрозненных параметров. Поскольку качество воды — это многомерная характеристика, отсутствие комплексного подхода к анализу взаимосвязанных физико-химических показателей затрудняет выявление реальных причин загрязнений. В связи с этим целью работы является разработка и исследование архитектуры многопараметрической системы мониторинга водных ресурсов, объединяющей сбор, локальную обработку данных на базе Edge Computing и их комплексную динамическую визуализацию. Научная новизна заключается в предложении иерархической модели мониторинга: на периферийном уровне реализованы алгоритмы первичной фильтрации и нормализации сигналов разнородных сенсоров, а на централизованном — детализированная визуализация временных рядов, позволяющая выявлять скрытые корреляции между физико-химическими показателями водной среды.

Проведенный анализ существующих исследований подтверждает эффективность IoT-подхода с точки зрения автоматизации сбора данных и раннего выявления загрязнений, при этом особое внимание уделяется созданию недорогих и энергоэффективных решений [1], [2]. Однако большинство разработок ориентировано преимущественно на аппаратную реализацию и передачу данных, тогда как задачи комплексной обработки многопараметрической информации и ее интерпретации остаются недостаточно проработанными [3], [4].

Использование методов интеллектуального анализа данных и машинного обучения частично решает проблему интерпретации, однако требует значительных вычислительных ресурсов и наличия обучающих выборок, что ограничивает их применение в распределенных системах мониторинга [5], [6]. В этой связи актуальным становится применение подходов периферийных вычислений (Edge Computing), позволяющих выполнять предварительную обработку данных непосредственно на уровне измерительных узлов и снижать нагрузку на каналы связи [7]. При этом в области программных платформ наблюдается тенденция к переходу от монолитных систем к стекам на основе брокеров сообщений и специализированных баз данных временных рядов, обеспечивающих высокую скорость обработки потоковых данных [8].

Таким образом, несмотря на достигнутый прогресс, остается нерешенной задача интеграции многопараметрических данных, их эффективной предварительной обработки в условиях ограниченных ресурсов и последующей интерпретации. Это определяет необходимость разработки архитектур мониторинга, сочетающих периферийную обработку и централизованный анализ, что и составляет предмет настоящего исследования.

Материалы и методы

Разработанная многопараметрическая система мониторинга построена на базе трехуровневой архитектуры, содержащей периферийный уровень, сетевой уровень и прикладной уровень. Структурная схема системы показана на рисунке 1.

При проектировании аппаратной части системы мониторинга (рисунок 1) основным требованием являлось обеспечение баланса между точностью измерений, стоимостью оборудования, энергоэффективностью и масштабируемостью системы для возможности развертывания распределенной сети мониторинга. С учетом этого был реализован периферийный уровень архитектуры.

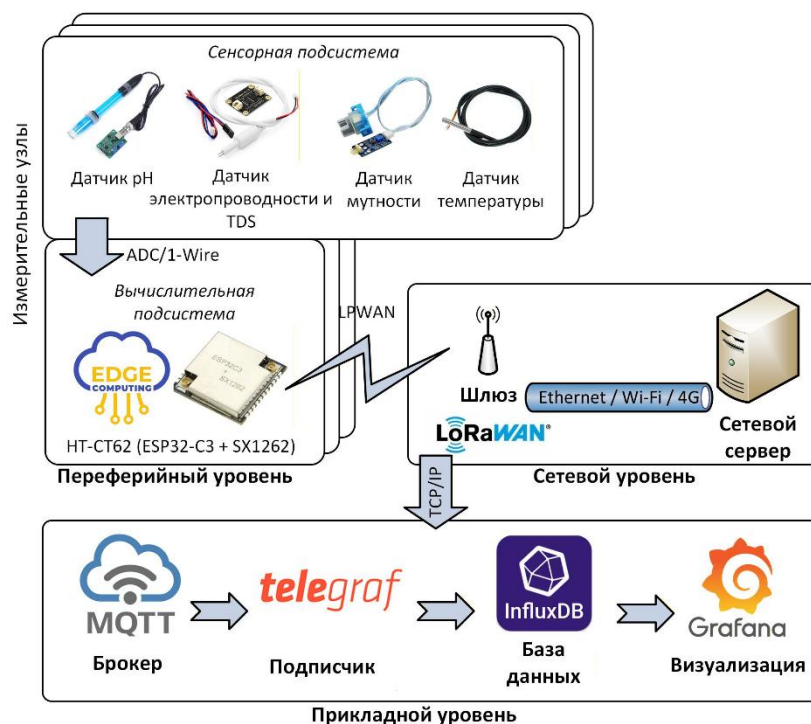


Рисунок 1 – Структурная схема многопараметрической системы мониторинга состояния водных ресурсов
Периферийный уровень.

В качестве контролируемых параметров воды выбраны pH, мутность и удельная электрическая проводимость ЕС или общая минерализация TDS, так как их совокупность позволяет оценить основные физико-химические процессы, влияющие на состояние водной среды. pH электрод используется благодаря высокой чувствительности к кислотно щелочным изменениям, отражающим природные и техногенные воздействия. Датчик ЕС или TDS применяется для интегральной оценки содержания растворённых веществ и уровня минерализации, а оптический датчик мутности обеспечивает контроль взвешенных частиц и позволяет выявлять эрозию, биологическую активность и механическое загрязнение. Дополнительно используется датчик температуры, поскольку она влияет на точность измерений pH и электропроводности и на интенсивность протекания физико химических процессов. В таблице 1 представлены технические характеристики сенсорной подсистемы.

Таблица 1 – Технические характеристики сенсорной подсистемы

Параметр	Датчик	Диапазон измерения	Интерфейс связи	Погрешность
Кислотность (pH)	Аналоговый pH-метр	0 – 14 pH	0 – 3.3 В (аналог)	±0.1 pH
Минерализация (TDS)	TDS-Meter V1.0	0 – 1000 ppm	0 – 2.3 В (аналог)	±10% F.S.
Мутность (Turbidity)	CONRAD 2734647	0 – 4550 NTU	0 – 4.5 В (аналог)	±3,5%
Температура	DS18B20	-55 – +125 °C	Цифровой (1-Wire)	±0.5 °C

Ввиду использования бюджетного сегмента сенсоров, в работе реализован ряд аппаратных и программных мер по повышению точности. В частности, проводится предварительная калибровка сенсорной подсистемы с использованием сертифицированных эталонных сред. Коррекция показаний pH-зонда выполнялась по трем точкам с применением стандартных буферных растворов, а калибровка кондуктометрического канала – по водным растворам NaCl с концентрацией от 100 до 1000 ppm. Для определения коэффициентов аппроксимации датчика мутности использовались модельные взвеси в диапазоне 0–1000 NTU.

Сенсорная и вычислительная подсистемы на периферийном уровне (рисунок 1) образуют измерительный узел, общее число которых зависит от задач мониторинга. На рисунке 2 представлена функциональная схема измерительного узла. Архитектура устройства спроектирована по модульному принципу. Сигналы с аналоговых сенсоров (pH, ЕС/TDS, мутность) поступают на входы прецизионного 16-битного 4-х канального $\Sigma\Delta$ аналого-цифрового преобразователя (АЦП) ADS1115, который осуществляет оцифровку и передачу данных в микроконтроллер (МК) по помехоустойчивой шине I2C. Использование внешнего АЦП с программируемым коэффициентом усиления (PGA) позволяет согласовать динамические диапазоны различных датчиков, устранить проблему нелинейности измерительного тракта и минимизировать влияние цифровых шумов МК.

Для обеспечения автономности системы питание сенсора мутности контролируется через электронный ключ в виде р-канального MOSFET-транзистора, управляемого МК. Также для сопряжения выходного сигнала датчика в схеме применен преобразователь уровней (ПУ на рисунке 2).

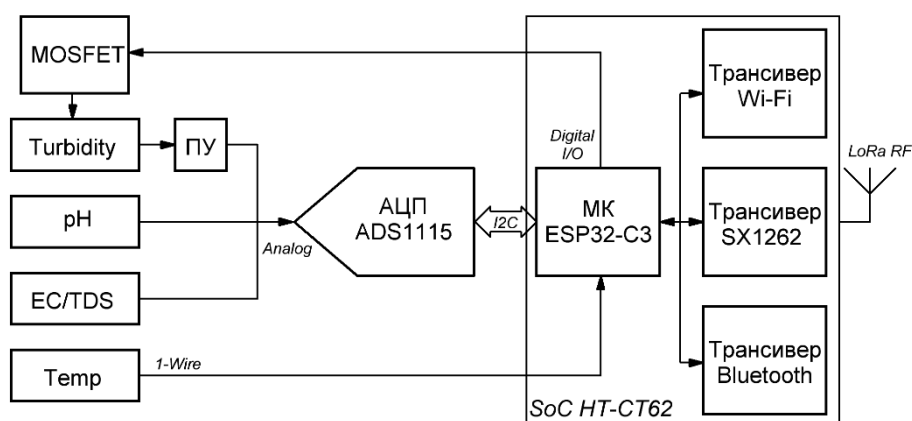


Рисунок 2 – Функциональная схема измерительного узла системы

Датчик температуры DS18B20 подключен по интерфейсу 1-Wire.

Вычислительным ядром измерительного узла системы является SoC (System-on-a-Chip) HT-CT62 на базе МК ESP32-C3 (архитектура RISC-V) [10]. Данный выбор обусловлен сочетанием высокой производительности и мультипротокольной коммуникационной гибкости. Интегрированный трансивер SX1262 обеспечивает передачу данных по протоколу LoRa/LoRaWAN на расстояния до нескольких километров, а встроенные модули Wi-Fi и Bluetooth 5.0 (LE) позволяют использовать устройство в инфраструктурных сетях и выполнять локальную калибровку сенсоров без нарушения герметичности корпуса.

Производительность 32-битного ядра достаточна для реализации концепции Edge Computing в реальном времени. Это минимизирует трафик за счет исключения передачи «сырых» данных. Кроме этого, монолитное исполнение модуля уменьшает электромагнитные наводки на чувствительные аналоговые тракты сенсоров.

Высокая энергоэффективность платформы (ток в режиме глубокого сна <20 мкА) в сочетании с открытой экосистемой разработки (Open Source SDK) делает данную SoC оптимальным вариантом для построения масштабируемых, автономных и научно воспроизводимых сетей экологического мониторинга.

В рамках разработанной архитектуры на уровне выбранного МК реализован алгоритм первичной обработки данных, направленный на повышение достоверности измерений и минимизацию нагрузки на канал связи LoRa. Структура данного алгоритма показана на рисунке 3.

В соответствии с рисунком 3, процесс обработки включает четыре этапа.

1. Двухкаскадная гибридная фильтрация представляет собой последовательное сочетание нелинейного медианного фильтра для устранения импульсных артефактов и линейного экспоненциального скользящего среднего для подавления аппаратных шумов АЦП. Это обеспечивает стабилизацию показаний бюджетных высокоомных сенсоров в условиях помех.



Рисунок 3 – Структурная схема процесса периферийных вычислений (Edge Computing)

2. Аналитическая трансформация и термокомпенсация обеспечивает перевод электрических сигналов в физические показатели на основе известных аппроксимационных моделей. В частности, для обеспечения инвариантности кондуктометрических измерений к температурным колебаниям среды применяется формула приведения электропроводности к стандартным условиям (25 °C):

$$EC_{25} = \frac{EC_t}{1 + \alpha(t - 25)}, \quad (1)$$

где EC_t – измеренное значение при текущей температуре; α – температурный коэффициент. Для измерений pH коррекция крутизны характеристики электрода выполняется согласно уравнению Нернста. [11]

3. Периферийное детектирование аномалий выполняет превалидацию данных по критериям физической достижимости и допустимой скорости изменения параметра. Выявление инструментальных ошибок на уровне узла позволяет исключить трансляцию недостоверной информации в общую базу данных.

4. Интеллектуальная агрегация выполняет упаковку обработанных данных в компактный бинарный формат (Payload), что минимизирует время занятия радиоканала и снижает энергопотребление трансивера при передаче.

Предложенная структура оптимизированного бинарного пакета с полезной нагрузкой (12 байт) представлена в таблице 2.

Таблица 2 – Структура пакета передаваемых данных по радиоканалу

Байт	Параметр	Тип данных	Диапазон	Описание
0-1	Водородный показатель (pH)	uint16	0 – 1400	pH * 100
2-3	Электропроводность (EC)	uint16	0 – 2000	мкСм/см
4-5	Мутность (Turbidity)	uint16	0 – 4550	NTU
6-7	Температура (Temp)	int16	-550 – +1250	°C * 10
8-9	Напряжение АКБ	uint16	0 – 5000	мВ
10-11	Флаги состояния (Status)	uint16	0 – 65535	коды ошибок/аномалии

Как следует из таблицы 2, для оптимизации объема полезной нагрузки по радиоканалу передается электропроводность (EC), а ее производный показатель TDS вычисляется на прикладном уровне.

Флаги состояния (байты 10-11 в таблице 2) представляют собой битовую маску, где каждый бит соответствует определенному событию самодиагностики:

- bit 0-3: отказ соответствующих сенсоров (pH, EC/TDS, Turbidity, Temp) с резервированием на возможное добавление дополнительных сенсоров;
- bit 4: критическое снижение уровня заряда аккумулятора;
- bit 5: детектирование аномального градиента изменения параметров (превышение порога);
- bit 6-15: резервные биты для будущих расширений системы.

Сетевой уровень.

Сетевой уровень системы (рисунок 1) спроектирован как масштабируемая среда передачи данных, обеспечивающая доставку информации от периферийных узлов к центральному серверу. Архитектура базируется на использовании протокола LoRaWAN (Class A) и включает следующие компоненты.

В качестве узла агрегации в системе предусмотрено использование многоканального LoRaWAN-шлюза, функционирующего в режиме ретранслятора. К оборудованию шлюза предъявляются требования наличия чипсета SX1302/SX1303 (8 и более каналов) и совместимости с протоколом Semtech UDP Packet Forwarder. Это обеспечивает высокую пропускную способность распределенной сети и минимизирует вероятность коллизий за счет одновременной обработки нескольких сигналов. Шлюз осуществляет инкапсуляцию радиопакетов в IP-трафик для трансляции на сетевой сервер.

Несмотря на приоритетность LPWAN-канала для полевых условий, использование SoC HT-CT62 позволяет реализовать адаптивную коммуникационную логику. Наличие интерфейса Wi-Fi IEEE 802.11 b/g/n (2.4 ГГц) обеспечивает возможность высокоскоростной передачи данных в зонах с развитой ИТ-инфраструктурой (лаборатории, промышленные объекты).

Центральным программным компонентом уровня является сетевой сервер на базе стека ChirpStack, решающий задачи управления парком устройств.

Основные функции сервера включают:

- обработку пакетов, принятых несколькими шлюзами, и расшифровку полезной нагрузки с использованием ключей безопасности AppSKey и NwkSKey;
- реализацию механизма ADR (Adaptive Data Rate) для оптимизации энергопотребления и дальности связи узлов;
- преобразование бинарных данных в структурированный JSON-формат и их трансляцию на прикладной уровень по протоколу MQTT в роли издателя.

Прикладной уровень.

Для обеспечения переносимости и изоляции серверная инфраструктура реализована на базе технологий контейнеризации Docker. Ключевые компоненты системы (MQTT-брокер, агент Telegraf, СУБД InfluxDB и платформа Grafana) функционируют как независимые контейнеры в единой виртуальной сети. Такое решение унифицирует развертывание и делает систему независимой от операционной системы хоста.

Информационный обмен выстроен в виде последовательного конвейера. Передача данных от сетевого сервера осуществляется через MQTT-брокер, выполняющий роль центральной асинхронной шины, что гарантирует слабую связность и отказоустойчивость системы. Далее в работу включается агент Telegraf, который выступает подписчиком MQTT-топиков, осуществляет парсинг JSON-пакетов и нормализует данные перед их сохранением.

В качестве хранилища используется InfluxDB — высокопроизводительная СУБД класса Time Series. Ее выбор обусловлен строгой оптимизацией под работу с непрерывными временными рядами: она обеспечивает высокую скорость записи, эффективное сжатие данных и поддержку аналитических запросов в реальном времени, что критически важно для динамического мониторинга водной среды.

Верхний сегмент прикладного уровня представлен аналитической платформой Grafana, обеспечивающей динамическую визуализацию многопараметрических данных (рисунок 4).

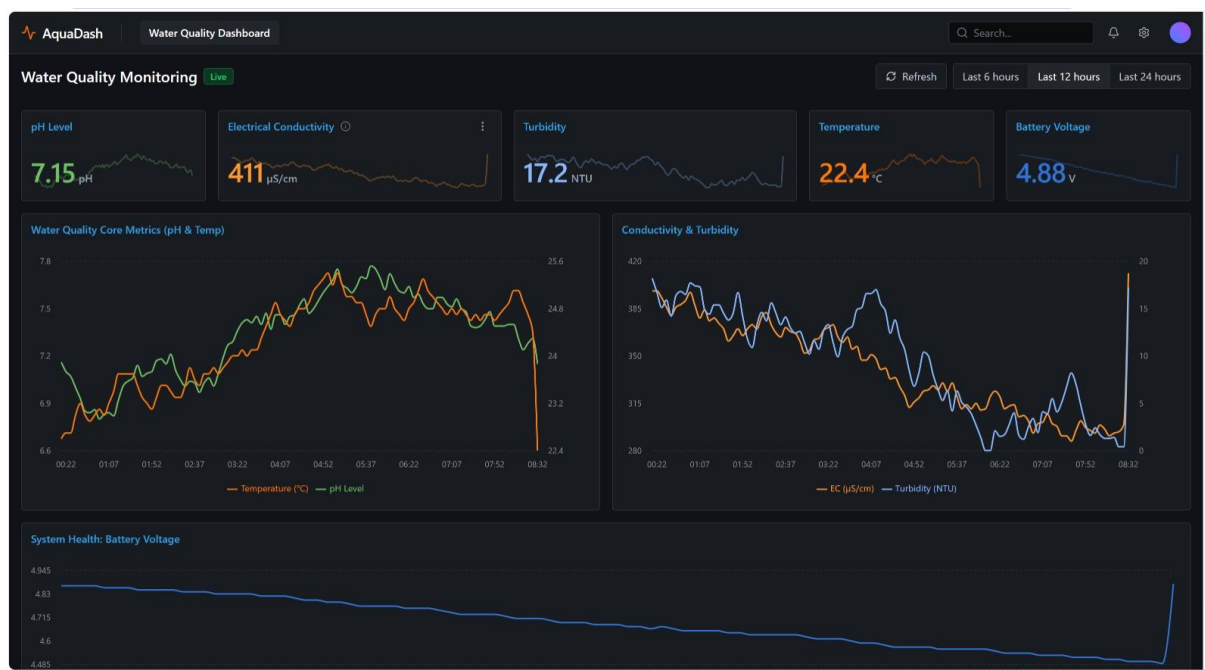


Рисунок 4 – Интерфейс разработанного Dashboard на Grafana

Итоговая визуализация и аналитика реализованы в среде Grafana, которая обеспечивает построение дашбордов, расчет показателя TDS по данным EC, выявление корреляций и генерацию предиктивных оповещений при нарушении экологических норм. Это завершает конвейер сквозной обработки данных от сенсоров до конечного пользователя.

Апробация системы выполнена на лабораторном стенде с использованием защищенного измерительного модуля. Для оптимизации энергопотребления реализован циклический режим работы: микроконтроллер переходит в глубокий сон с обесточиванием датчика мутности между измерениями. Установленный период опроса в 15 минут оптимален для мониторинга инерционных гидрохимических процессов.

Результаты и их обсуждение

Апробация разработанной архитектуры подтвердила эффективность распределения вычислительной нагрузки между периферийным и прикладным уровнями. Использование прецизионного 16-битного АЦП в сочетании с алгоритмами каскадной фильтрации на стороне МК позволило нивелировать аппаратные ограничения бюджетной сенсорной подсистемы, снизив суммарную инструментальную погрешность измерений до $\pm 2-3\%$. Реализация Edge-вычислений обеспечила трансформацию «сырых» сигналов в верифицированные физико-химические показатели непосредственно в точке сбора данных, что минимизировало объем передаваемой информации.

Оптимизация структуры полезной нагрузки до 12-байтного бинарного формата позволила отказаться от избыточной текстовой сериализации (JSON/XML), что обеспечило сокращение времени нахождения узла в эфире более чем в 8 раз. Анализ производительности сквозного тракта данных показал, что среднее время задержки от момента фиксации события до его отображения в интерфейсе Grafana не превышает 1,5–2 секунд. Исследование энергетического бюджета при интервале опроса 15 минут выявило средний ток потребления периферийного оборудования на уровне 435 мкА, что

гарантирует расчетную автономность измерительного узла до 260 суток при использовании аккумулятора емкостью 3400 мАч.

Межуровневое взаимодействие на базе протоколов LoRaWAN и MQTT обеспечило полную вендорнезависимость инфраструктуры. Экспериментально подтвержденная инвариантность архитектуры к моделям шлюзов и сетевых серверов создает условия для линейного масштабирования системы до регионального уровня. Коммуникационная гибкость платформы ESP32-C3 позволила интегрировать Wi-Fi для передачи данных в локальных зонах покрытия и Bluetooth 5.0 (LE) для бесконтактной калибровки калибровочных коэффициентов в EEPROM без прерывания цикла мониторинга. Использование полностью открытого стека технологий (RISC-V, ChirpStack, InfluxDB) исключило зависимость от проприетарных платформ, обеспечив прозрачность аудита безопасности данных.

Несмотря на достигнутые показатели, выявлен ряд ограничений, связанных с временным дрейфом электрохимических сенсоров и их деградацией в агрессивной среде, что требует периодического обслуживания. Зависимость дальности LoRa-связи от рельефа и плотности застройки определяет необходимость прецизионного планирования размещения шлюзов. Снижение емкости аккумуляторов при отрицательных температурах накладывает лимиты на частоту опроса в зимний период. Дальнейшее развитие системы целесообразно направить на разработку алгоритмов адаптивной дискретизации данных и механизмов самодиагностики сенсоров для увеличения межсервисных интервалов при долгосрочной эксплуатации на удаленных объектах.

Заключение

В ходе исследования спроектирована и верифицирована сквозная архитектура многопараметрического мониторинга, объединяющая концепцию Edge Computing и сетевые стандарты LPWAN. Разработанное решение на базе МК с архитектурой RISC-V и прецизионных внешних АЦП доказало возможность получения достоверных данных при использовании бюджетной сенсорной базы за счет алгоритмической компенсации погрешностей непосредственно на периферийном уровне.

Интеграция контейнеризованного программного стека MQTT-InfluxDB-Grafana обеспечила высокую скорость обработки потоковых данных и полную вендорнезависимость инфраструктуры. Научная новизна работы заключается в обосновании иерархической модели обработки данных, которая позволяет минимизировать использование радиочастотного ресурса и обеспечивает линейную масштабируемость сети до регионального уровня без модификации программного ядра системы.

Практическая значимость исследования подтверждена достижением высокой автономности и коммуникационной гибкости прототипа, адаптированного для эксплуатации в полевых условиях и интеграции в экосистемы «Smart City». Перспективы развития проекта связаны с внедрением механизмов адаптивной дискретизации и интеллектуальной самодиагностики сенсоров, что позволит повысить эксплуатационную надежность и увеличить межсервисные интервалы системы при долгосрочном мониторинге удаленных природных и промышленных объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Naloufi, M., Abreu, T., Souihi, S., Therial, C., Rodrigues, N. A. d. P., Le Goff, A. G., Saad, M., Vinçon-Leite, B., Dubois, P., Delarbre, M., Kennouche, P., & Lucas, F. S. (2024). Long-Term Stability of Low-Cost IoT System for Monitoring Water Quality in Urban Rivers. *Water*, 16(12), 1708. <https://doi.org/10.3390/w16121708>.

2. Wiryasaputra, R., Huang, C.-Y., Lin, Y.-J., & Yang, C.-T. (2024). An IoT Real-Time Potable Water Quality Monitoring and Prediction Model Based on Cloud Computing Architecture. *Sensors*, 24(4), 1180. <https://doi.org/10.3390/s24041180>.
3. J. J. H. Rojas, R. F. A. Bonifacio, J. M. B. Peña, D. R. Q. Leon, C. D. R. Peña, and K. G. P. Torres, “Sensors and IoT for Water Quality Monitoring: A Systematic Review of Technologies and Field Validation”, *J Robot Control (JRC)*, vol. 6, no. 6, pp. 2844–2858, Dec. 2025.
4. Flores-Iwasaki, M., Guadalupe, G. A., Pachas-Caycho, M., Chapa-Gonza, S., Mori-Zabarburú, R. C., & Guerrero-Abad, J. C. (2025). Internet of Things (IoT) Sensors for Water Quality Monitoring in Aquaculture Systems: A Systematic Review and Bibliometric Analysis. *AgriEngineering*, 7(3), 78. <https://doi.org/10.3390/agriengineering7030078>.
5. Gangani Dharmarathne, A.M.S.R. Abekoon, Madhusa Bogahawaththa, Janaka Alawatugoda, D.P.P. Meddage, A review of machine learning and internet-of-things on the water quality assessment: Methods, applications and future trends, *Results in Engineering*, Volume 26, 2025, 105182, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105182>.
6. Vicente, E. C., Silva, L. A., da Rocha Fernandes, A. M., & Parreira, W. D. (2025). A Structured Review of IoT-Based Embedded Systems and Machine Learning for Water Quality Monitoring. *Applied Sciences*, 15(21), 11719. <https://doi.org/10.3390/app152111719>.
7. Pires, L. M., & Gomes, J. (2024). River Water Quality Monitoring Using LoRa-Based IoT. *Designs*, 8(6), 127. <https://doi.org/10.3390/designs8060127>.
8. Al-Okby, M. F. R., Junginger, S., Roddelkopf, T., & Thurow, K. (2025). RTIMS: Real-Time Indoor Monitoring Systems: A Comprehensive Review. *Applied Sciences*, 15(24), 13217. <https://doi.org/10.3390/app152413217>.
9. Zulkifli, C. Z., Garfan, S., Talal, M., Alamoodi, A. H., Alamleh, A., Ahmaro, I. Y. Y., Sulaiman, S., Ibrahim, A. B., Zaidan, B. B., Ismail, A. R., Albahri, O. S., Albahri, A. S., Soon, C. F., Harun, N. H., & Chiang, H. H. (2022). IoT-Based Water Monitoring Systems: A Systematic Review. *Water*, 14(22), 3621. <https://doi.org/10.3390/w14223621>.
10. HT-CT62, ESP32C3 + SX1262 LoRa Node. DataSheet [https://resource.heltec.cn/download/HT-CT62/HT-CT62\(Rev1.1\).pdf](https://resource.heltec.cn/download/HT-CT62/HT-CT62(Rev1.1).pdf) (24 марта 2026).
11. Электрохимия и кинетика: учебник / Т. В. Аксенова; под общ. ред. В. А. Черепанова. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2024. — 324 с.

Алексей Савостин, т.ғ.к., профессор, «Манаш Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті» КЕАҚ, Петропавл, Қазақстан, asavostin@ku.edu.kz

Юлия Герасимова, т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, «Манаш Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті» КЕАҚ, Петропавл, Қазақстан, julyvic@mail.ru

Сергей Латыпов, PhD, қауымдастырылған профессор, «Манаш Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті» КЕАҚ, Петропавл, Қазақстан, silatypov@ku.edu.kz

Анатолий Проселков, докторант, «Манаш Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті» КЕАҚ, Петропавл, Қазақстан, proselkov96@mail.ru

Дархан Узбеков, магистрант, «Манаш Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті» КЕАҚ, Петропавл, Қазақстан, uzbekovd21@gmail.com

Аңдатпа. Мақалада Интернет заттары (IoT) және перифериялық есептеулер (Edge Computing) негізінде су сапасын автоматтандырылған мониторингтеу жүйесінің архитектурасы ұсынылған. Деректерді жинау, LoRaWAN арқылы беру және TIG стеги негізінде нақты уақыт режимінде визуализациялау үшін масштабталатын аппараттық-бағдарламалық платформа әзірленді. Деректерді бастапқы өңдеу үшін RISC-V микроконтроллерін қолдану, соның ішінде сүзгілеу және температуралық компенсация, желілік трафик көлемін 8 есеге азайтуға және құралдық қателікті $\pm 2-3\%$ деңгейіне дейін төмендетуге мүмкіндік берді. Энергия тұтынуды 435 мкА дейін оңтайландыру өлшеу тораптарының 260 тәулікке дейін автономды жұмыс істеуін қамтамасыз етеді. Ұсынылған вендорға тәуелсіз шешім қашықтағы нысандарға бейімделген және «Smart City» жүйелеріне біріктіруге арналған.

Түйін сөздер: Интернет заттары, су ресурстарын мониторингтеу, Edge Computing, LoRaWAN, RISC-V, экологиялық қауіпсіздік.

Alexey Savostin, candidate of technical sciences, professor, NLC «Manash Kozybayev North Kazakhstan university», Petropavlovsk, Kazakhstan, asavostin@ku.edu.kz

Yuliya Gerasimova, candidate of technical sciences, associate professor, NLC «Manash Kozybayev North Kazakhstan university», Petropavlovsk, Kazakhstan, julyvic@mail.ru

Sergey Latypov, PhD, associate professor, NLC «Manash Kozybayev North Kazakhstan University», Petropavlovsk, Kazakhstan, silatypov@ku.edu.kz

Anatoliy Prosselkov, doctoral student, NLC «Manash Kozybayev North Kazakhstan University», Petropavlovsk, Kazakhstan, proselkov96@mail.ru

Darkhan Uzbekov, master student, NLC «Manash Kozybayev North Kazakhstan University», Petropavlovsk, Kazakhstan, uzbekovd21@gmail.com

MULTIPARAMETER MONITORING OF WATER RESOURCES BASED ON EDGE COMPUTING AND LORAWAN TECHNOLOGIES

Abstract. The paper presents the architecture of an automated water quality monitoring system based on the Internet of Things (IoT) and Edge Computing. A scalable hardware and software platform has been developed for real-time data acquisition, transmission via LoRaWAN, and visualization using the TIG stack. The use of a RISC-V microcontroller for primary data processing, including filtering and temperature compensation, made it possible to reduce network traffic volume by eight times and decrease instrumental error to $\pm 2-3\%$. Energy consumption optimization down to 435 μA ensures autonomous operation of measurement nodes for up to 260 days. The proposed vendor-independent solution is adapted for remote sites and integration into Smart City systems.

Keywords: Internet of Things, water resource monitoring, Edge Computing, LoRaWAN, RISC-V, environmental safety.

Редакцияға түсті / Поступила в редакцию / Received 10.03.2026

Жариялауға қабылданды / Принята к публикации / Accepted 30.03.2026