

Айжан Есболовна Назырова – PhD, старший преподаватель кафедры «Технологий искусственного интеллекта», Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва, г. Астана, Казахстан; e-mail: nazyrova_aye_1@enu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9162-6791>.

Алтай Альшерович Туякбаев – кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры «Робототехники и технических средств автоматики», Satbayev University, г. Алматы, Казахстан; e-mail: a.tuyakbayev@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1246-5935>.

Жанибек Назарбекулы Исабеков – PhD, ассоциированный профессор кафедры «Робототехники и технических средств автоматики», Satbayev University, г. Алматы, Казахстан; e-mail: z.issabekov@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2900-8025>.

Авторлар туралы мәліметтер

Еркебулан Амандыкович Тулешов – техникалық ғылымдар кандидаты, Роботты техника және автоматиканың техникалық құралдары кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: y.tuleshov@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9146-7137>.

Айжан Есболқызы Назырова – PhD, «Жасанды интеллект технологиялары» кафедрасының аға оқытушысы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия Ұлттық Университеті, Астана қ., Қазақстан; e-mail: nazyrova_aye_1@enu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9162-6791>.

Алтай Альшерович Туякбаев – техникалық ғылымдар кандидаты, Роботты техника және автоматиканың техникалық құралдары кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: a.tuyakbayev@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1246-5935>.

Жанібек Назарбекұлы Исабеков – PhD, Роботты техника және автоматиканың техникалық құралдары кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: z.issabekov@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2900-8025>.

Received 01.04.2025

Revised 11.05.2025

Accepted 26.05.2025

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-3\(19\)-2](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-3(19)-2)



МРНТИ: 28.23.19



Ж.Е. Байғараева*, Б.Т. Иманбек, А.К. Болтабоева, Д. Турмаханбет, Г.А. Амирханова

Казахский национальный университет имени аль-Фараби,

050040, Казахстан, Алматы, пр. Аль Фараби 71,

*e-mail: zhanel.baigarayeva@gmail.com

ИНТЕГРАЦИЯ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ЗДОРОВЬЯ ПАЦИЕНТА И ФАКТОРОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Аннотация: В статье рассматриваются перспективы интеграции технологий Интернета вещей (IoT) и алгоритмов машинного обучения (МО) для создания интеллектуальной системы мониторинга качества воздуха. Дополнительно описывается модуль мониторинга физиологических показателей пациента (HR, HRV-метрики SDNN, RMSSD, LF/HF, дыхательная частота, SpO₂, АД), интегрированный в единую IoT-архитектуру и конвейер анализа данных. Представлен прототип с потоковой агрегацией медицинских и средовых сигналов, правилами раннего оповещения и сценарием совместной интерпретации параметров воздуха и состояния пациента. Основное внимание уделяется использованию IoT-сенсоров, методам обработки данных в реальном времени и прогнозированию загрязнения воздуха с помощью гибридных моделей МО, включая Random Forest, Gradient Boosting Machines и Long Short-Term Memory (LSTM). Подчеркивается значимость повышения чувствительности и надежности сенсоров с применением наноматериалов, таких как полианилин, графен и углеродные нанотрубки. Акцентируется важность защиты данных, энергоэффективности и устойчивости масштабируемых IoT-систем, а также их роль в снижении экологических рисков и поддержке концепции «умных городов». Рассматриваются пути интеграции таких систем в городскую инфраструктуру, включая решения для автоматизации анализа данных и визуализации. В статье также обсуждаются перспективы внедрения интеллектуальных систем мониторинга в промышленной и жилой инфраструктуре для

повышения уровня экологического контроля. Особое внимание уделяется разработке моделей прогнозирования, которые учитывают сезонные и климатические изменения, влияющие на уровень загрязнения. Подчеркивается важность междисциплинарного подхода, объединяющего достижения в области IoT, нанотехнологий и машинного обучения, для решения задач устойчивого развития городов. Представленные результаты демонстрируют высокую эффективность и практическую применимость подхода для контроля загрязнения воздуха, улучшения здоровья населения, защиты окружающей среды и стимулирования устойчивого урбанистического развития.

Ключевые слова: интернет вещей (IoT), машинное обучение, мониторинг качества воздуха, прогнозирование загрязнения, энергоэффективность, устойчивое развитие, Long Short-Term Memory (LSTM), системы SCADA.

Введение

В последние десятилетия подходы к мониторингу качества воздуха значительно эволюционировали. Традиционные методы, полагающиеся на громоздкое оборудование, часто лишены способности обрабатывать данные в реальном времени, что ограничивает их эффективность в динамичной городской среде. Однако развитие технологий Интернета вещей (IoT) и машинного обучения (МО) кардинально изменило эту ситуацию. Сегодня IoT-сенсоры в сочетании с методами МО позволяют не только собирать данные в реальном времени, но и прогнозировать уровни загрязнения воздуха, улучшая управление качеством окружающей среды и создавая основу для принятия превентивных мер.

Исследования показывают, что применение IoT и МО в мониторинге воздуха имеет значительные преимущества. В работе [1] представлена IoT-система, которая использует алгоритмы МО для прогнозирования уровня загрязнения воздуха в реальном времени. Такой подход позволяет не только оперативно собирать данные, но и анализировать их для принятия обоснованных решений. В исследовании [2] использование IoT-сенсоров и алгоритмов МО продемонстрировало высокую точность прогнозирования индекса качества воздуха (AQI), что подтверждает эффективность таких технологий в реальных условиях. Ещё один интересный пример – исследование [3], в котором алгоритмы машинного обучения применялись с недорогими сенсорами для улучшения точности прогноза AQI, делая такие системы доступными для использования в масштабах городов. Особое внимание уделяется улучшению качества сенсоров. Например, в работе [4] исследуются способы повышения чувствительности датчиков за счёт использования полианилина (PANI) и наночастиц оксидов металлов (МОх), что позволило достичь высокой стабильности и точности. Подобные усовершенствования делают IoT-системы незаменимыми для мониторинга в условиях крупных мегаполисов. В исследовании [5] представлена IoT-система, позволяющая прогнозировать уровни загрязнения в реальном времени с учётом аналитики данных, что даёт возможность оперативно принимать меры. Дальнейшее развитие этого подхода было продемонстрировано в работе [6], где в модели дополнительно учитывались транспортные потоки и погодные условия для повышения точности прогнозов.

Использование наноматериалов также сыграло важную роль в усовершенствовании сенсоров. Например, в работе [7] описаны датчики на основе полианилина, которые продемонстрировали высокую проводимость и стабильность при мониторинге качества воздуха. Ещё больший эффект достигается при добавлении графена и углеродных нанотрубок, как отмечается в исследовании [8], что значительно повышает чувствительность и долговечность сенсоров. Безопасность передачи данных является ещё одним важным аспектом современных IoT-систем. В работе [9] обсуждается необходимость защиты данных, особенно для недорогих сенсоров, уязвимых к внешним угрозам. Авторы предлагают использовать методы криптографии и аутентификации, как это подробно описано в [10], что минимизирует риски утечек информации.

Методы машинного обучения продолжают развиваться, предлагая гибридные подходы к прогнозированию качества воздуха. Например, в исследовании [11] анализируются преимущества гибридных моделей перед традиционными методами, а в [12] показано, как Long Short-Term Memory (LSTM) в сочетании с рекуррентными нейронными сетями (RNN) позволяет достичь высокой точности при минимальных вычислительных затратах. С увеличением числа городов, применяющих IoT-технологии, возникает необходимость масштабируемых решений. В работе [13] описаны проблемы масштабируемости и предложены подходы для повышения энергоэффективности и чувствительности сенсоров. Оптимизация энергопотребления устройств остаётся ключевым вызовом, как это

подчёркивается в [14], где акцент сделан на долгосрочную надёжность систем. Интеграция IoT и МО не только улучшает мониторинг воздуха, но и способствует устойчивому развитию городов. Это особенно актуально в контексте концепции умных городов, где такие системы являются критически важными для здоровья населения и экологической стабильности, как отмечено в работе [15].

Разработка интеллектуальной системы мониторинга основывается на многоуровневой архитектуре, включающей уровень сбора данных, уровень передачи и связи, а также уровень обработки и анализа данных в облаке или на краевых узлах [16]. На первом уровне используются разнообразные носимые устройства и сенсоры, способные измерять такие параметры, как ЭКГ, пульс, давление, температура, уровень кислорода в крови и даже биомаркеры, характеризующие состояние пациента. Эти устройства, интегрированные в сеть IoMT (Internet of Medical Things), передают данные в режиме реального времени через защищенные беспроводные протоколы, такие как BLE, Zigbee, Wi-Fi или 5G [17].

На втором уровне осуществляется маршрутизация данных через шлюзы и узлы краевых вычислений (edge computing), что позволяет предварительно обрабатывать и фильтровать данные непосредственно вблизи источника их возникновения, снижая задержки и требования к пропускной способности сети [17]. Далее данные передаются на облачные платформы, где используются мощные вычислительные ресурсы для окончательной обработки, хранения и анализа с использованием алгоритмов машинного обучения [16]. Такая гибридная архитектура, сочетающая облачные и краевые вычисления, позволяет обеспечить масштабируемость системы, высокую скорость обработки и оперативное реагирование на изменения в параметрах здоровья пациентов [16].

Многоуровневая архитектура также предусматривает использование протоколов безопасности для защиты данных от несанкционированного доступа, включая шифрование информации и аутентификацию пользователей на уровне устройств и серверов [17, 18]. Дополнительные меры безопасности включают применение технологий блокчейна для обеспечения целостности и прозрачности данных, что является важным аспектом в медицинских приложениях [19].

Научная новизна работы заключается в (1) объединении потоков средовых параметров с физиологическими сигналами пациента в едином IoT–ML контуре, (2) разработке правил раннего оповещения, учитывающих совместные паттерны HRV и качества воздуха, (3) прототипе архитектуры с масштабируемым брокером сообщений, сквозной безопасностью и SCADA-интеграцией, (4) протоколе валидации с метриками прогнозирования и оценкой неопределённости. Практический вклад – реплицируемая архитектура и сценарии применения в лабораторной и клинично-инженерной среде.

Архитектура системы

Система разработана на базе надежной серверной архитектуры, включающей Python API, SQL для хранения данных экспериментов и SCADA (система диспетчеризации и управления), обеспечивающую наблюдение и контроль лабораторных процессов в режиме реального времени. Ключевую роль в мониторинге окружающей среды играют IoT-устройства, такие как сенсоры температуры, влажности, давления и газоанализаторы (CO₂, CO, TVOC). Медицинский подмодуль включает носимые и стационарные датчики: оптический PPG-сенсор (SpO₂, пульс, дыхательный ритм), ЭКГ-нагрудный ремень, тонометр. Потоки HR/HRV (SDNN, RMSSD, LF/HF), SpO₂ и АД поступают через BLE/HTTPS на шлюз, нормализуются (z-оценка, артефакт-фильтрация), синхронизируются по времени с CO₂/PM/температурой/влажностью и далее анализируются ML-конвейером (RF/GBM/LSTM) для выявления совместных паттернов и триггеров оповещения. Эти устройства собирают важнейшие данные, которые не только поддерживают стандарты безопасности, но и используются для обучения алгоритмов машинного обучения. Такие алгоритмы помогают прогнозировать изменения окружающей среды и параметры сенсоров, чтобы повысить их эффективность.

Цель архитектуры системы – обеспечить точность и устойчивость процессов, связанных с разработкой хеморезистивных датчиков. IoT-устройства непрерывно фиксируют данные о состоянии окружающей среды и химических реакциях, которые затем анализируются с помощью алгоритмов машинного обучения. Изменения температуры и влажности могут повлиять на такие процессы, как полимеризация полианилина или распределение наночастиц в композитах. Благодаря прогнозированию таких эффектов,

исследователи могут своевременно корректировать параметры работы, минимизируя вероятность отклонений.

Лабораторные процессы дистанционно управляются за счет системы SCADA, вследствие чего разработанная система является безопасной и легко управляемой. Система SCADA обеспечивает наблюдаемость и трассировку состояния оборудования, а также журналирование событий для технического и научного аудита. Этические и юридические аспекты: в текущей версии использованы технические и имитационные сценарии без вмешательства в клиническое принятие решений; персональные данные де-идентифицируются, доступ – по ролям, хранение – шифрование на диске и в канале. При расширении до пилотных наблюдений планируется письменное информированное согласие и одобрение локального этического комитета. Также система поддерживает соединение с глобальными серверами и мобильными приложениями, обеспечивая удобный удаленный доступ для совместной исследовательской деятельности.

На рисунке 1 представлена структура интеллектуальной лаборатории, объединяющая технологии IoT и машинного обучения. Центральным элементом системы выступает сервер, который связывает интеллектуальные устройства и сенсоры через коммуникационный узел на основе Node.js.

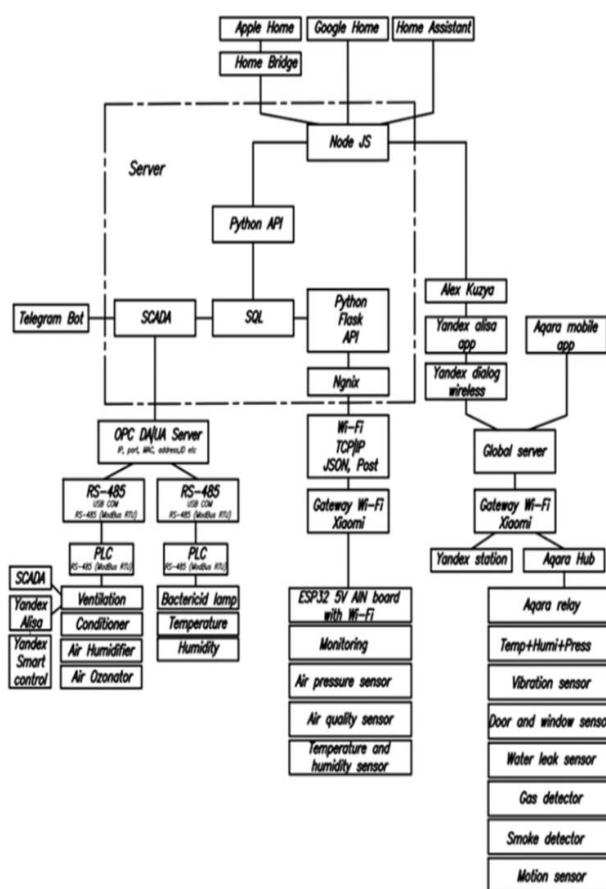


Рисунок 1 – Архитектура системы

Система также совместима с популярными платформами автоматизации, такими как Apple Home и Google Home, что упрощает взаимодействие с лабораторией через интуитивно понятные интерфейсы.

Предлагаемая архитектура включает интеллектуальные модули управления HVAC, которые играют ключевую роль в поддержании стабильных условий для выполнения химических процессов. Алгоритмы машинного обучения обрабатывают данные с газовых сенсоров и других параметров окружающей среды, оптимизируя работу HVAC. Это помогает избежать потенциальных опасностей и снизить энергозатраты. Постоянный контроль энергопотребления лаборатории и использование прогнозирующих возможностей алгоритмов машинного обучения обеспечивают высокую энергоэффективность без ущерба для комфорта и безопасности.

Результаты

В нашей интеллектуальной лаборатории интеграция технологий IoT и алгоритмов машинного обучения вышла на новый уровень благодаря созданию системы мониторинга, способной контролировать как параметры здоровья пациента, так и окружающую среду. Лаборатория дополнена интеллектуальными системами контроля электрооборудования, включая реле и разъёмы, что позволяет автоматически управлять нагрузкой, снижать энергопотребление и минимизировать риски отказов.

В медицинскую часть прототипа входят следующие сигналы: HR, HRV (SDNN, RMSSD, LF/HF), дыхательная частота, SpO₂, артериальное давление. Реализованы два сценария: (S1) раннее оповещение о перегрузке автономной регуляции при сочетании повышения CO₂/TVOC и сдвига HRV-профиля; (S2) адаптивное управление вентиляцией и персональными уведомлениями при обнаружении устойчивых корреляций между микроклиматом и снижением показателей SpO₂/вариабельности ритма. Веб-панель отображает согласованные временные ряды и маркеры событий.

В рамках проведённого исследования была разработана и внедрена интеллектуальная система мониторинга, объединяющая технологии Интернета вещей (IoT), алгоритмы машинного обучения и системы SCADA. Основной целью работы стало создание комплексного подхода к сбору, обработке и анализу данных, направленного на обеспечение точного контроля параметров здоровья пациента и факторов окружающей среды в режиме реального времени. Интеграция SCADA позволила осуществить эффективный мониторинг и удалённое управление всеми компонентами системы, обеспечивая надёжность и стабильность работы. Научная и технологическая основа проекта базируется на применении современных сенсорных технологий, высокоточных алгоритмов обработки данных и средств автоматизации процессов. Результаты, представленные в данной главе, демонстрируют практическую реализацию поставленных задач, высокую эффективность предложенных решений и их перспективность для использования в различных сценариях эксплуатации..

Современное оборудование лаборатории, представленное на рисунке 2, осуществлен в Институте проблем горения в Алматы. Лаборатория включает в себя сенсорные модули для сбора данных, центральную вычислительную станцию для обработки информации, а также системы кондиционирования и вентиляции, обеспечивающие стабильность работы аппаратуры. Разработанные сенсоры, выполненные на основе усовершенствованных материалов и схем, обладают высокой точностью и надёжностью в определении ключевых параметров, таких как температура, влажность и качество воздуха. Эти устройства интегрированы в общую IoT-архитектуру, позволяющую передавать данные в режиме реального времени на сервер для дальнейшей обработки. Прототипы сенсоров, показанные на рисунке 2, демонстрируют применение передовых подходов к дизайну и миниатюризации, что делает их универсальными для использования в различных условиях.



Рисунок 2 – Интеллектуальная лаборатория

Для внедрения системы в лаборатории, были разработаны прототипы датчиков при помощи технологии печатных плат (PCB), они выполнены на основе усовершенствованных материалов и схем, обладают высокой точностью и надёжностью в определении ключевых

параметров, таких как температура, влажность и качество воздуха. Эти устройства интегрированы в общую IoT-архитектуру, позволяющую передавать данные в режиме реального времени на сервер для дальнейшей обработки. Представленные прототипы датчиков на рисунке 3 включают в себя измерительные элементы для мониторинга таких параметров, как влажность, температура, качество воздуха и другие факторы окружающей среды. Печатные платы были спроектированы с учётом интеграции в архитектуру Интернета вещей, что позволяет передавать данные в реальном времени через протоколы связи на сервер. Прототипы отличаются высокой надёжностью и функциональностью, что делает их пригодными для использования в составе системы.

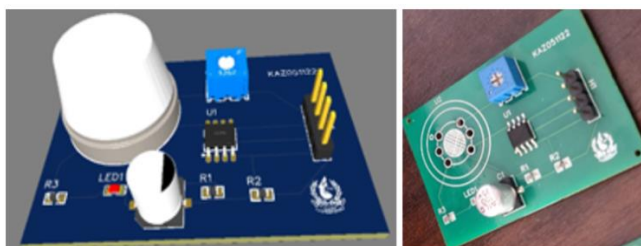


Рисунок 3 – Прототипы датчиков

На рисунке 4 показаны анализы данных на основе данных, которые были собраны из IoT-датчиков. Результаты обучения моделей машинного обучения демонстрируют их высокую эффективность. Random Forest и Gradient Boosting Machines показали превосходные результаты в задачах классификации и регрессии, обеспечивая точное предсказание ключевых параметров. Использование Long Short-Term Memory (LSTM) позволило учесть временные зависимости в данных, что значительно повысило точность предсказаний в условиях мониторинга в реальном времени. Графики потерь показывают быстрое снижение ошибок на этапах обучения и валидации, что подтверждает качественную настройку гиперпараметров моделей.

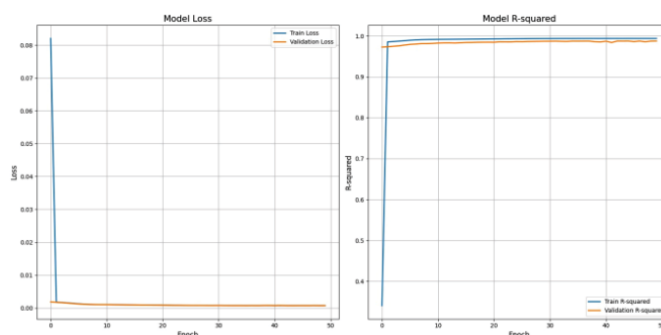


Рисунок 4 – Метрики обучения моделей

Качество моделей оценено по MAE, RMSE и R^2 , динамика обучения показана на кривых обучения (рис. 4). Взаимосвязи между параметрами окружающей среды представлены матрицей корреляций (рис. 5).

Для того, чтобы выявить соотношение между параметрами было осуществлено корреляционная матрица, отражающая взаимосвязи между различными параметрами окружающей среды, измеряемыми в рамках работы интеллектуальной лаборатории. Этот метод анализа служит инструментом для выявления и визуализации зависимостей между ключевыми показателями, такими как температура, влажность, уровень углекислого газа (CO_2), концентрация летучих органических соединений (TVOC) и энергопотребление. Каждая ячейка матрицы содержит значение коэффициента корреляции, который характеризует степень линейной взаимосвязи между двумя переменными. Высокие положительные значения (+1) указывают на сильную прямую связь, отрицательные значения (близкие к -1) сигнализируют об обратной зависимости, а значения, близкие к нулю, свидетельствуют об отсутствии существенной линейной взаимосвязи.

Для улучшения интерпретации матрица представлена с использованием цветовой градации: насыщенные тёплые цвета (например, красный) подчеркивают сильную

положительную связь, тогда как насыщенные холодные оттенки (например, синий) указывают на выраженную отрицательную корреляцию. Так, значительная связь между температурой и энергопотреблением может быть использована для оптимизации системы HVAC, позволяя предсказывать периоды максимальных нагрузок и эффективно перераспределять ресурсы. Анализ таких взаимосвязей играет важнейшую роль в построении прогностических моделей, помогая определить параметры, оказывающие наибольшее влияние на систему.

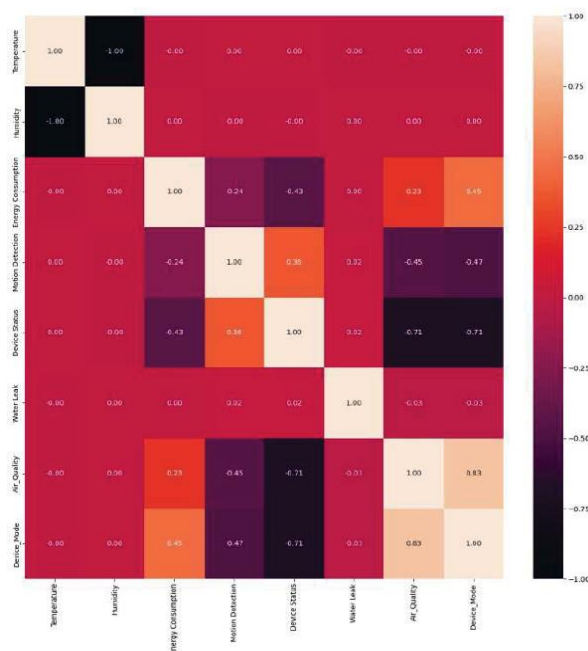


Рисунок 5 – Матрица корреляции набора данных

В ходе проведённого исследования удалось продемонстрировать высокую эффективность предложенной системы мониторинга, основанной на интеграции IoT, машинного обучения и SCADA. Результаты обучения моделей Random Forest, Gradient Boosting Machines и LSTM подтвердили их точность и практическую применимость для анализа данных в режиме реального времени. Графики обучения и корреляционный анализ показали, что система способна выявлять и учитывать ключевые зависимости между параметрами, такими как температура, влажность, качество воздуха и энергопотребление, что важно для оптимизации работы оборудования и управления ресурсами.

Эти результаты подчёркивают корректность выбранного подхода, а также подтверждают возможность дальнейшего использования системы для повышения точности прогностических моделей и эффективности управления в различных условиях эксплуатации. Разработанная архитектура обеспечивает стабильность, адаптивность и готовность к интеграции новых компонентов для расширения функциональности.

Результаты проведённого исследования подтвердили высокую эффективность интеграции технологий Интернета вещей (IoT), систем SCADA и алгоритмов машинного обучения для создания интеллектуальной системы мониторинга. Разработанная система продемонстрировала способность в режиме реального времени собирать, обрабатывать и анализировать данные о параметрах здоровья пациента и окружающей среды, обеспечивая высокую точность предсказаний и возможность оперативного принятия решений. Использование алгоритмов Random Forest, Gradient Boosting Machines и LSTM позволило добиться высокой точности моделей и учёта временных зависимостей, что особенно важно для анализа динамически изменяющихся параметров. Визуализация данных с помощью корреляционной матрицы помогла выявить ключевые зависимости между факторами окружающей среды, такими как температура, влажность и энергопотребление, что открывает возможности для дальнейшей оптимизации системы управления. Интеграция SCADA-системы в архитектуру лаборатории значительно повысила надёжность мониторинга и управления, обеспечив удалённый доступ к данным и возможность автоматического реагирования на изменения. Это позволяет улучшить энергоэффективность, минимизировать

риски отказов и обеспечить высокую стабильность работы оборудования. Разработанная интеллектуальная система мониторинга представляет собой надёжное, эффективное и масштабируемое решение, которое может быть применено как в медицинской практике, так и в системах экологического мониторинга. Перспективы дальнейшего развития включают расширение функционала системы, интеграцию новых типов сенсоров и усовершенствование алгоритмов анализа данных для ещё большей точности и адаптивности. Исследование не включало вмешательств и не использовало идентифицируемые данные человека. Валидация носила технический и лабораторный характер. В случае последующих пилотов на реальных объектах будет получено одобрение локального этического комитета и письменные согласия, если это потребует протоколом.

Ограничения исследования

Настоящая версия прототипа подтверждает техническую реализуемость предложенной IoT–ML архитектуры в лабораторной среде, при этом объём и разнообразие данных ограничены одним полигоном и набором задействованных датчиков. Внешняя валидация на независимых локациях не проводилась. Будущая работа предусматривает расширение набора данных, многоузловые испытания и сравнение с дополнительными моделями прогнозирования. Исследование не включало вмешательств и не использовало идентифицируемые данные человека. Валидация носила технический и лабораторный характер. В случае последующих пилотов на реальных объектах будет получено одобрение локального этического комитета и письменные согласия, если это потребует протоколом.

Список литературы

1. Air Quality Monitoring and Forecasting System using IoT and Machine Learning Techniques / Q.A. Tran et al // 2022 6th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD), Nha Trang City, Vietnam. – 2022. – P. 786-792. <https://doi.org/10.1109/GTSD54989.2022.9988756>.
2. Bobulski J. An IoT System for Air Pollution Monitoring with Safe Data Transmission / J. Bobulski, S. Szymoniak, K. Pasternak // Sensors. – 2024. – № 24. – P. 445. <https://doi.org/10.3390/s24020445>.
3. Pazhanivel D.B. Design and Enhancement of a Fog-Enabled Air Quality Monitoring and Prediction System: An Optimized Lightweight Deep Learning Model for a Smart Fog Environmental Gateway / D.B. Pazhanivel, A.N. Velu, B.S. Palaniappan // Sensors. – 2024. – № 24. – P. 5069. <https://doi.org/10.3390/s24155069>.
4. An IoT enabled system for enhanced air quality monitoring and prediction on the edge / A.S. Moursi et al // Complex Intell. – 2021. – № 7. – P. 2923-2947. <https://doi.org/10.1007/s40747-021-00476-w>.
5. An IoT based system for magnify air pollution monitoring and prognosis using hybrid artificial intelligence technique / A. Almalawi et al // Environmental Research. – 2022. – Vol. 206. – P. 112576. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112576>.
6. Adaptive machine learning strategies for network calibration of IoT smart air quality monitoring devices / S. De Vito et al // Pattern Recognition Letters. – 2020. – Vol. 136. – P. 264-271. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2020.04.032>.
7. Smart Air Quality Monitoring IoT-Based Infrastructure for Industrial Environments / L. García et al // Sensors. – 2022. – № 22. – P. 9221. <https://doi.org/10.3390/s22239221>.
8. Ullo S.L. Advances in Smart Environment Monitoring Systems Using IoT and Sensors / S.L. Ullo, G.R. Sinha // Sensors. – 2020. – № 20. – P. 3113. <https://doi.org/10.3390/s20113113>.
9. A deep learning approach for prediction of air quality index in smart city / A. Binbusayyis et al // Discov Sustain. – 2024. – № 5. – P. 89. <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00272-9>.
10. A Machine Learning Model for Air Quality Prediction for Smart Cities / U. Mahalingam et al // International Conference on Wireless Communications Signal Processing and Networking (WiSPNET), Chennai, India. – 2019. – P. 452-457. <https://doi.org/10.1109/WiSPNET45539.2019.9032734>.
11. Indoor Air Quality Monitoring Systems for Enhanced Living Environments: A Review toward Sustainable Smart Cities / G. Marques et al // Sustainability. – 2020. – № 12. – P. 4024. <https://doi.org/10.3390/su12104024>.

12. Myeong S. Integrating Data-Based Strategies and Advanced Technologies with Efficient Air Pollution Management in Smart Cities / S. Myeong, K. Shahzad // Sustainability. – 2021. – № 13. – P. 7168. <https://doi.org/10.3390/su13137168>.
13. Integration of IoT-Enabled Technologies and Artificial Intelligence (AI) for Smart City Scenario: Recent Advancements and Future Trends / M.E.E. Alahi et al // Sensors. – 2023. – № 23. – P. 5206. <https://doi.org/10.3390/s23115206>.
14. IoT-Enabled Smart Sustainable Cities: Challenges and Approaches / L. Belli et al // Smart Cities. – 2020. – № 3. – P. 1039-1071. <https://doi.org/10.3390/smartcities3030052>.
15. Zeng F. Sensors on Internet of Things Systems for the Sustainable Development of Smart Cities: A Systematic Literature Review / F. Zeng, C. Pang, H. Tang // Sensors. – 2024. – № 24. – P. 2074. <https://doi.org/10.3390/s24072074>.
16. Aldahiri A. Trends in Using IoT with Machine Learning in Health Prediction System / A. Aldahiri, B. Alrashed, W. Hussain // Forecasting. – 2021. – № 3. – P. 181-206. <https://doi.org/10.3390/forecast3010012>.
17. Disease Diagnosis System for IoT-Based Wearable Body Sensors with Machine Learning Algorithm / J. Awotunde et al // Hybrid Artificial Intelligence and IoT in Healthcare. Intelligent Systems Reference Library. – vol. 209. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2972-3_10.
18. Alshamrani M. IoT and artificial intelligence implementations for remote healthcare monitoring systems: A survey / M. Alshamrani // Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences. – 2022. – Vol. 34, Issue 8, Part A. – P. 4687-4701. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2021.06.005>.
19. Alharbe N. IoT-enabled healthcare transformation leveraging deep learning for advanced patient monitoring and diagnosis / N. Alharbe, M. Almalki // Multimed Tools Appl. – 2025. – № 84. – P. 21331-21344. <https://doi.org/10.1007/s11042-024-19919-w>.

Благодарности

Данное исследование финансировалось за счет гранта Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан AP23488586 «Разработка интеллектуальной системы мониторинга и профилактики сердечно-сосудистых заболеваний с использованием глубокого обучения и IoMT (Интернет медицинских вещей)» (2024-2026).

Ж.Е. Байғараева*, Б.Т. Иманбек, А.К. Болтабоева, Д. Турмаханбет, Г.А. Амирханова

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
050040, Қазақстан, Алматы, Әл Фараби даңғылы 71
*e-mail: zhanel.baigarayeva@gmail.com

НАУҚАСТАРДЫҢ ДЕНСАУЛЫҒЫН ЖӘНЕ ҚОРШАҒАН ОРТАНЫҢ ФАКТОРЛАРЫН БАҚЫЛАУҒА АРНАЛҒАН АҚЫЛДЫ ЖҮЙЕНІ ӨЗІРЛЕУ ҮШІН ЗАТТАР ИНТЕРНЕТІ МЕН МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУДЫ ИНТЕГРАЦИЯЛАУ

Мақалада ауа сапасын бақылаудың зияткерлік жүйесін құру үшін Заттар интернеті (IoT) технологияларын және машиналық оқыту (МО) алгоритмдерін интеграциялау перспективалары қарастырылады. Қоса алғанда, бірыңғай IoT-архитектураға және деректерді талдау конвейеріне біріктірілген пациенттің физиологиялық көрсеткіштерін мониторингтеу модулі (HR, HRV метрикалары – SDNN, RMSSD, LF/HF, тыныс алу жиілігі, SpO₂, артериялық қысым – АҚ) сипатталады. Медициналық және орта факторлары сигналдарын ағынды түрде агрегаттайтын, ерте ескерту ережелері бар және ауа параметрлері мен пациенттің жай-күйін бірлесіп түсіндіру сценарийі бар прототип ұсынылады. Негізгі назар IoT-сенсорларды қолдануға, деректерді нақты уақыт режимінде өңдеу әдістеріне және Random Forest, Gradient Boosting Machines мен Long Short-Term Memory (LSTM) секілді МО-дың гибриді модельдері арқылы ауа ластануын болжауға аударылады. Полианилин, графен және көміртекті нанотүтікшелер сияқты наноматериалдарды қолдану арқылы сенсорлардың сезімталдығы мен сенімділігін арттырудың маңыздылығы атап өтіледі. Деректерді қорғаудың, энергоүнемділіктің және масштабталатын IoT-жүйелердің орнықтылығының маңыздылығы, сондай-ақ олардың экологиялық тәуекелдерді азайтудағы және «ақылды қалалар» тұжырымдамасын қолдаудағы рөлі айқындалады. Мұндай жүйелерді қалалық инфрақұрылымға интеграциялау жолдары, соның ішінде деректер талдауын және визуализацияны автоматтандыруға арналған шешімдер қарастырылады. Сондай-ақ экологиялық бақылау деңгейін арттыру мақсатында зияткерлік мониторинг жүйелерін өнеркәсіптік және тұрғын

инфрақұрылымға енгізу перспективалары талқыланады. Ластану деңгейіне әсер ететін маусымдық және климаттық өзгерістерді ескеретін болжау модельдерін әзірлеуге ерекше көңіл бөлінеді. Қалалардың тұрақты дамуы мәселелерін шешу үшін IoT, нанотехнология және машиналық оқыту салаларындағы жетістіктерді біріктіретін пәнаралық көзқарастың маңыздылығы атап өтіледі. Ұсынылған нәтижелер ауа ластануын бақылау, халықтың денсаулығын жақсарту, қоршаған ортаны қорғау және тұрақты урбанистік дамуды ынталандыру үшін аталған тәсілдің жоғары тиімділігі мен практикалық қолданбалығын көрсетеді.

Түйін сөздер: заттар интернеті (IoT), машиналық оқыту, ауаның сапасын бақылау, ластануды болжау, энергия тиімділігі, тұрақты даму, Long Short-Term Memory (LSTM), SCADA жүйелері.

Zh.E. Baigarayeva*, B.T. Imanbek, A.K. Boltaboyeva, D. Turmakhanbet, G.A. Amirkhanova

Al-Farabi Kazakh National University,
050040, Kazakhstan, Almaty, Al Farabi av.71
*e-mail: zhanel.baigarayeva@gmail.com

INTEGRATION OF THE INTERNET OF THINGS AND MACHINE LEARNING FOR THE DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT SYSTEM FOR MONITORING PATIENT HEALTH AND ENVIRONMENTAL FACTORS

The article examines prospects for integrating Internet of Things (IoT) technologies and machine learning (ML) algorithms to create an intelligent air-quality monitoring system. It additionally describes a patient physiological-monitoring module – covering heart rate (HR), HRV metrics (SDNN, RMSSD, LF/HF), respiratory rate, SpO₂, and blood pressure (BP) – integrated into a unified IoT architecture and data-analysis pipeline. A prototype is presented with streaming aggregation of medical and environmental signals, early-warning rules, and a scenario for jointly interpreting air parameters and patient status. The focus is on IoT sensors, real-time data processing methods, and air-pollution forecasting using hybrid ML models, including Random Forest, Gradient Boosting Machines, and Long Short-Term Memory (LSTM) networks. The importance of improving sensor sensitivity and reliability through nanomaterials such as polyaniline, graphene, and carbon nanotubes is emphasized. The article highlights data protection, energy efficiency, and the resilience of scalable IoT systems, as well as their role in reducing environmental risks and supporting the «smart city» concept. It considers pathways for integrating such systems into urban infrastructure, including solutions for automated data analysis and visualization. The article also discusses prospects for deploying intelligent monitoring systems in industrial and residential infrastructure to enhance environmental oversight. Particular attention is paid to developing forecasting models that account for seasonal and climatic variations affecting pollution levels. An interdisciplinary approach that combines advances in IoT, nanotechnology, and ML is underscored as essential for addressing sustainable urban development challenges. The presented results demonstrate high effectiveness and practical applicability for controlling air pollution, improving public health, protecting the environment, and promoting sustainable urban development.

Key words: Internet of Things (IoT), machine learning, air quality monitoring, pollution forecasting, energy efficiency, sustainable development, Long Short-Term Memory (LSTM), SCADA systems.

Информация об авторах

Жанель Ермашқызы Байғараева* – докторант, Казахский Национальный университет им. аль-Фараби, Алматы; e-mail: zhanel.baigarayeva@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1919-3570>.

Бағлан Талғатқызы Иманбек – PhD, и.о. доцента, старший преподаватель, Казахский Национальный университет им. Аль-Фараби, Алматы; e-mail: baglan.imanbek@kaznu.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7249-380X>.

Асия Кубландикизы Болтабоева – докторант, Казахский Национальный университет им. Аль-Фараби, Алматы; e-mail: boltaboyeva_assiya3@live.kaznu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7279-9910>

Динара Турмаханбет – бакалавр студент 4 курса, Казахский Национальный университет им. Аль-Фараби, Алматы; e-mail: turmahanbetdinara@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-8388-4979>.

Гульшат Аманжоловна Амирханова – PhD, старший преподаватель, Казахский Национальный университет им. Аль-Фараби, Алматы; e-mail: gulshat.aa@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3933-5476>.

Авторлар туралы мәліметтер

Жанель Ермашқызы Байғараева* – докторанты, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы; e-mail: zhanel.baigarayeva@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1919-3570>.

Бағлан Талғатқызы Иманбек – PhD, доцент м.а., аға оқытушы, Өл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы; e-mail: baglan.imanbek@kaznu.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7249-380X>.

Асия Кубландикызы Болтабоева – магистр, PhD 1 курс студенті, Өл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы; e-mail: boltaboyeva_assiya3@live.kaznu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7279-9910>.

Гульшат Аманжоловна Амирханова – PhD, аға оқытушы, Өл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы; e-mail: gulshat.aa@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3933-5476>.

Information about the authors

Zhanel Yermashkyzy Baigarayeva* – master of technical sciences, 3rd year PhD student, Al Farabi Kazakh National University, Almaty; e-mail: zhanel.baigarayeva@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1919-3570>.

Baglan Talgatkyzy Imanbek – PhD, Acting Associate Professor, Senior Lecturer, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty; e-mail: baglan.imanbek@kaznu.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7249-380X>.

Assiya Kublandikyzy Boltaboyeva – master of technical sciences, 1st year PhD student, Al Farabi Kazakh National University, Almaty; e-mail: boltaboyeva_assiya3@live.kaznu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7279-9910>.

Gulshat Amanzholovna Amirkhanova – PhD, Senior Lecturer, Kazakh National University named after Al-Farabi, Almaty; e-mail: gulshat.aa@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3933-5476>.

Поступила в редакцию 02.06.2025

Поступила после доработки 06.08.2025

Принята к публикации 21.08.2025

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-3\(19\)-3](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-3(19)-3)

MPHTI: 06.81.23; 81.93.29



М.А. Бакыт, Х. Молдамурат, Д.М. Калманова*, О. Абдирашев, А. Конырханова

Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева,

010000 Республика Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2

*e-mail: dinara_kalmanova@mail.ru

МОДИФИКАЦИЯ АЛГОРИТМА ЛЕГКОВЕСНОГО ПОТОЧНОГО ШИФРОВАНИЯ CHACHA20

Аннотация: Обеспечение безопасной и высокоскоростной передачи данных для низкоорбитальных летательных аппаратов (НОЛА) является приоритетной задачей в современном мире. Целью данного исследования является модификация существующих методов шифрования для НОЛА, преодолевающая недостатки в скорости и уязвимости к новым кибератакам, включая квантовые. Основная идея заключается в разработке гибридного подхода, сочетающего оптимизированный легковесный потоковый шифр ChaCha20 с протоколом квантового распределения ключей BB84. Это позволит обеспечить высокую скорость шифрования и информационно-теоретическую безопасность ключевого обмена, которая неуязвима для квантовых атак. Методология исследования включает анализ существующих криптографических решений, моделирование производительности предложенного гибридного алгоритма, а также интеграцию механизмов обнаружения аномалий на основе машинного обучения (LSTM) для повышения надежности системы. Основные результаты показывают, что предложенный метод значительно улучшает пропускную способность, снижает задержки и энергопотребление по сравнению с традиционными подходами, обеспечивая при этом устойчивость к современным и будущим угрозам. Ценность работы заключается во внесении вклада в развитие постквантовой криптографии для аэрокосмической отрасли и создании основы для разработки более безопасных и эффективных систем связи НОЛА, что имеет прямое практическое значение для мониторинга окружающей среды, точного земледелия и обеспечения национальной безопасности.

Ключевые слова: шифрование данных, низкоорбитальные летательные аппараты, ChaCha20, квантовое распределение ключей, BB84, кибербезопасность.