

АНАЛИЗ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Макаров М.С., Жолдошбаев К.А., Верзунов С.Н.

Кыргызско-Российский Славянский Университет им. Б.Н. Ельцина

Данная работа посвящена разработке концепции высоконадежных и масштабируемых систем мониторинга, которые могли бы эффективно предотвращать геотехнические риски в Кыргызстане, стране, характеризующейся высоким уровнем сейсмической активности. Подчеркивается важность систематического мониторинга различных аспектов окружающей среды, таких как вибрация, температура, влажность и давление. Это необходимо для оперативного реагирования на возможные угрозы и для эффективного предотвращения аварийных ситуаций, которые могут возникать в результате природных и техногенных изменений. Рассматривается роль передовых информационных технологий, сенсорных устройств и методов искусственного интеллекта в создании систем мониторинга, способных значительно повышать уровень безопасности и устойчивости критически важных инфраструктурных объектов. Обсуждение также охватывает текущие проблемы и перспективы развития в этом направлении, включая вопросы анализа и интеграции собранных данных, что в итоге способствует улучшению доступности и эффективности систем мониторинга. Это делает их более применимыми для реальных условий эксплуатации, обеспечивая тем самым надежное функционирование системы в ответ на динамично изменяющиеся условия окружающей среды. Подчеркивается, что для достижения максимальной эффективности систем мониторинга необходимо учитывать как технические аспекты сбора и обработки данных, так и методологические подходы к их анализу. Это требует применения комплексного подхода, который включает разработку и реализацию новейших технологических решений, способных обеспечить достаточную гибкость и адаптивность системы к вариативности природных и техногенных факторов риска.

Ключевые слова: геотехнический мониторинг, интеллектуальная система мониторинга, обработка данных, сбор данных, анализ данных, хранение данных.

Введение

Как известно, в год в Кыргызстане отмечается в среднем около 13 000 сейсмических событий, из них мы ощущаем около 25, сила их не превышает 4 – 5 баллов. Это довольно слабые землетрясения. [1]. На рисунке 1 показана карта интенсивности сейсмической активности на территории Кыргызской Республики.

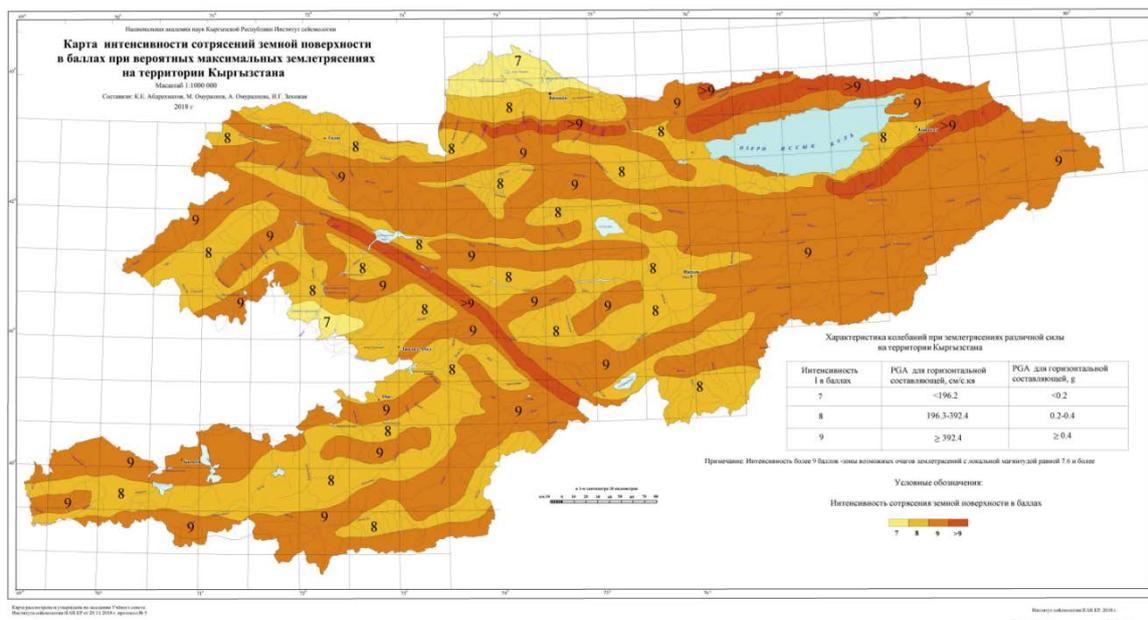


Рисунок 1– Карта сейсмической активности в Кыргызстане

В свете этих данных становится очевидной необходимость в разработке мер по укреплению безопасности зданий и сооружений, так как, несмотря на то, что большинство из

этих событий остаются относительно слабыми, регулярное возникновение таких землетрясений подчеркивает потребность в надежных системах мониторинга. В этом контексте концепция интеллектуальной системы мониторинга состояния зданий и сооружений призвана обеспечить повышенную защиту и сохранность инфраструктурных объектов, используя продвинутое технологии для точного и своевременного обнаружения потенциальных угроз.

В последние десятилетия значительное внимание ученых привлекают интеллектуальные системы мониторинга, которые позволяют повысить безопасность и устойчивость зданий и сооружений. Эти системы особенно актуальны в регионах с высокой сейсмической активностью и сложными климатическими условиями. Разработка и внедрение таких систем основываются на последних достижениях в области информационных технологий, сенсорных устройств, анализа данных и искусственного интеллекта.

Существующие исследования в области интеллектуальных систем мониторинга зданий и сооружений обычно фокусируются на нескольких аспектах: разработка и применение датчиков и сенсорных систем, алгоритмы обработки и анализа собранных данных, интеграция существующих технологий в управлении инфраструктурой, а также масштабирование и надежность серверных решений. Многие исследователи, например в работе [2], подчеркивают важность реального времени для анализа данных с целью предотвращения и минимизации последствий аварийных ситуаций.

Ключевым элементом интеллектуальных систем мониторинга является использование разнообразных датчиков, таких как акселерометры, тензодатчики, термодатчики и устройства для измерения влажности и давления. Эти устройства устанавливаются в критических точках зданий и сооружений и предоставляют данные для дальнейшего анализа. Особое внимание в современных исследованиях уделяется разработке низкочастотных, но высокоэффективных датчиков, что делает мониторинг доступным во многих местах [3].

Для обработки и анализа данных, собранных с датчиков, используются продвинутое алгоритмы машинного обучения и искусственного интеллекта. Эти алгоритмы способны обрабатывать большие объемы данных и выявлять потенциальные угрозы до того, как они приведут к серьезным последствиям. Авторы в работе [4] обсуждают использование нейронных сетей для предсказания деформаций и разрушений зданий на основе исторических данных и реальных измерений.

Интеграция интеллектуальных систем мониторинга в существующую инфраструктуру управления зданиями и сооружениями представляет собой сложную задачу, которая требует согласования между различными уровнями управления и технологий. Масштабируемость системы критична, так как она должна обрабатывать данные с большого количества объектов и интегрироваться с другими системами управления [5].

В свете интеграции интеллектуальных систем мониторинга с широкой инфраструктурой управления особое значение приобретает разработка концепции, которая способствует повышению безопасности и сохранности зданий и сооружений. Эта концепция учитывает не только масштабируемость системы для обработки данных с множества объектов, но и обеспечивает её способность адаптироваться к условиям, характерным для регионов с высокими рисками, такими как сейсмическая активность и экстремальные климатические изменения. Использование современных технологий, таких как датчики, способствует точному мониторингу ключевых параметров в режиме реального времени, что является фундаментальным для идентификации и предотвращения потенциальных угроз.

Концепция интеллектуальной системы мониторинга, разрабатываемая для обеспечения безопасности и сохранности зданий и сооружений

Такая концепция является особенно актуальной в условиях повышенной сейсмической активности и экстремальных климатических условий. Интеллектуальная система предполагает не только непрерывный сбор данных, но и их анализ с помощью алгоритмов машинного обучения, чтобы предсказывать потенциальные угрозы и автоматически

принимать меры для предотвращения возможных аварий. Это включает в себя автоматическую систему оповещений, которая информирует ответственных лиц о необходимости проведения ремонта или эвакуации в случае обнаружения критических изменений в параметрах мониторинга.

Ключевым моментом концепции является создание масштабируемой и надежной серверной инфраструктуры, которая способна обрабатывать большие объемы данных, обеспечивая их хранение, защиту и доступность для анализа. Интеграция с облачными сервисами и использование передовых технологий баз данных усиливает эффективность системы и позволяет реализовывать комплексные решения для безопасности зданий на основе данных, собранных с различных объектов по всей стране.

Исходя из вышесказанного, можно выделить следующую цель и задачи настоящей работы. Основная цель – разработка концепции интеллектуальной системы мониторинга состояния зданий и сооружений для повышения эффективности их эксплуатации и сокращения расходов на техническое обслуживание [5].

Задачами являются:

- обеспечение непрерывного мониторинга ключевых параметров, влияющих на состояние зданий (температура, влажность, вибрация, деформации и т.д.) в режиме реального времени;
- предоставление руководству и эксплуатационному персоналу аналитической информации о текущем состоянии зданий для принятия эффективных управленческих решений;
- интеграция системы мониторинга с существующими информационными системами организации (базы данных эксплуатации объектов, системы диспетчеризации, учета ресурсов и т.д.);
- повышение надёжности и безопасности эксплуатации зданий за счёт своевременного выявления проблемных участков;
- выбор и внедрение необходимых технологических решений (датчики, передача данных, аппаратная платформа, программное обеспечение);
- обеспечение надежности и отказоустойчивости системы мониторинга.

Структура интеллектуальной системы мониторинга состояния зданий и сооружений, показанная на рисунке 2, представляет собой комплексное решение, включающее в себя несколько ключевых компонентов и технологий, организованных для обеспечения надёжного сбора, обработки и анализа данных о состоянии инфраструктурных объектов. Вот основные элементы структуры такой системы:

1. **Датчики и устройства сбора данных.** Это основа системы, включающая различные типы датчиков, такие как акселерометры, гироскопы, температурные датчики, датчики влажности, давления и прочие. Они устанавливаются на критически важных участках зданий и сооружений для мониторинга физических и экологических параметров.
2. **Сбор и передача данных.** Собранные датчиками данные передаются через проводные или беспроводные сети. Используются различные технологии передачи данных, такие как Wi-Fi, LoRa, ZigBee или LTE, которые обеспечивают надёжную и эффективную трансмиссию данных к центральным обработчикам.
3. **Серверная инфраструктура и облачные технологии.** Эти элементы предназначены для хранения, обработки и анализа больших объемов данных, поступающих от датчиков. Облачные платформы обеспечивают масштабируемость и доступность системы, позволяя использовать передовые аналитические и вычислительные ресурсы.

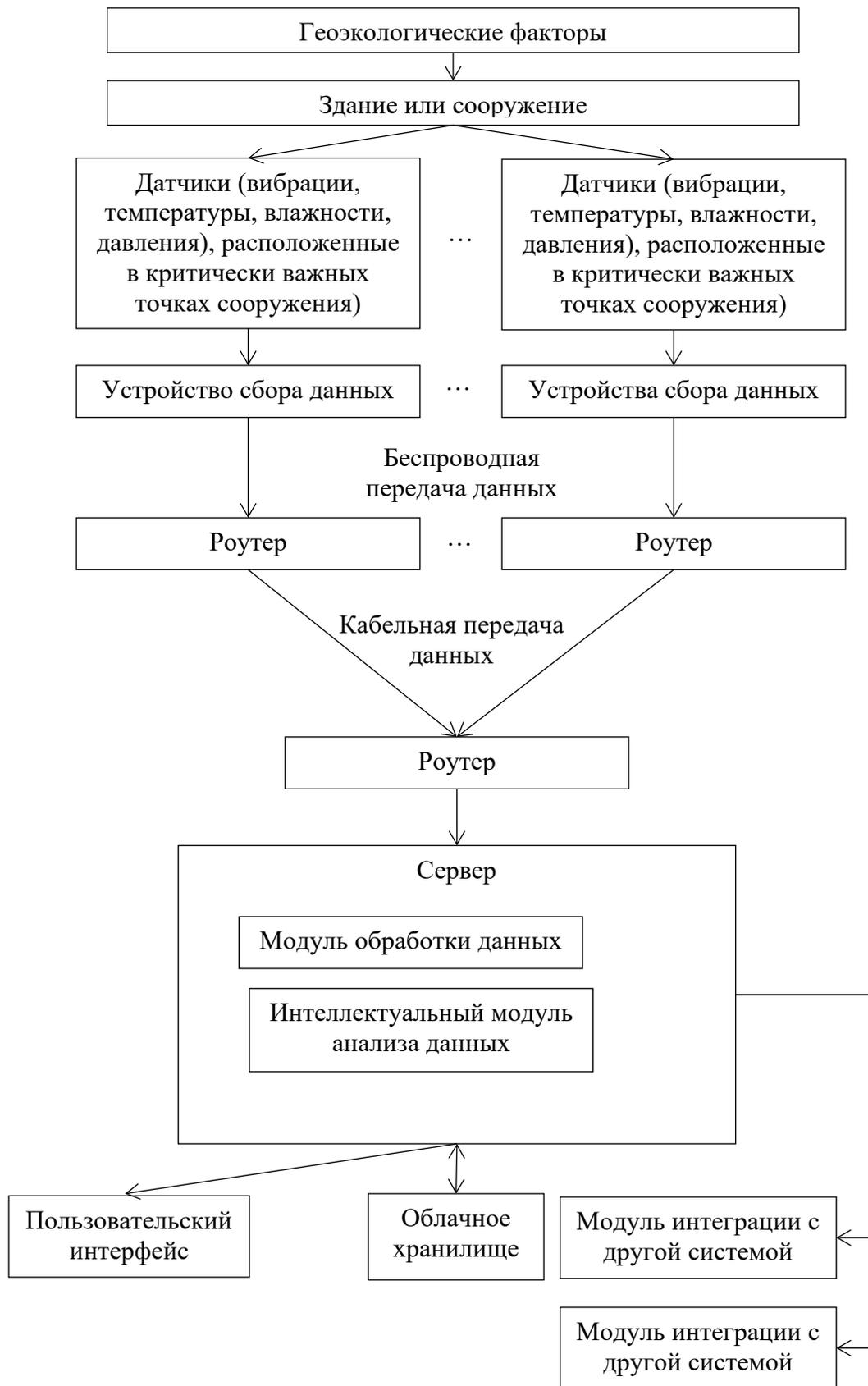


Рисунок 2 – Структура системы геотехнического мониторинга

4. **Программное обеспечение для анализа данных и машинного обучения.** Программное обеспечение используется для анализа собранных данных с помощью алгоритмов машинного обучения и искусственного интеллекта. Это позволяет не только обрабатывать информацию, но и прогнозировать потенциальные риски, анализировать тренды и формировать предупреждения о возможных аварийных ситуациях.
5. **Интерфейсы пользователя и системы визуализации.** Пользовательские интерфейсы позволяют операторам и инженерам визуализировать и интерпретировать данные, предоставляемые системой мониторинга. Визуализация может включать дашборды, графики, карты и другие графические инструменты, которые делают информацию доступной и понятной.
6. **Интеграция с другими системами.** Интеллектуальная система мониторинга часто интегрируется с другими системами управления зданием или инфраструктурой, такими, как системы диспетчеризации, пожарной безопасности и системы управления ресурсами, для обеспечения комплексного подхода к управлению безопасностью и эффективности объектов.

Комбинация этих шести элементов формирует мощную и эффективную систему, способную не только отслеживать текущее состояние инфраструктурных объектов, но и предвидеть возможные проблемы, планировать необходимые ремонтные работы и управлять рисками в реальном времени. Однако в рамках разработки и реализации интеллектуальной системы мониторинга важно определить и структурировать взаимодействия между всеми заинтересованными сторонами, как внутренними, так и внешними. Эта система предназначена не только для отслеживания текущего состояния инфраструктурных объектов, но и для прогнозирования потенциальных проблем, планирования ремонтных работ и управления рисками в условиях реального времени. Такой подход требует тесного сотрудничества различных подразделений и юридических лиц, которые участвуют в использовании и поддержке системы, а также от лиц, ответственных за принятие решений, касающихся ключевых требований к системе. Поэтому концепция затрагивает несколько внешних лиц, задействованных в использовании и поддержке системы, а также определяет ответственных за принятие решений по ключевым требованиям к системе, показанных в таблице 1.

Таблица 1. Идентификация окружения интеллектуальной системы геотехнического мониторинга

Категория	Заинтересованные стороны	Роли и обязанности
Внутренние заинтересованные стороны		
Разработчики и инженеры	Инженеры-конструкторы, программисты, тестировщики	Ответственны за проектирование, разработку и тестирование системы. Разрабатывают архитектуру системы, выбирают технологии, кодируют программное обеспечение и устраняют технические неисправности
Менеджеры проекта	Проектные менеджеры, координаторы	Курируют планирование проекта, реализующего предлагаемую концепцию, его выполнение в установленные сроки и бюджет. Управляют ресурсами, координируют действия команды и взаимодействуют с заинтересованными сторонами для обеспечения соблюдения требований и стандартов проекта
Аналитики данных	Специалисты по анализу данных, статистики	Анализируют данные, собранные сенсорами, для выявления трендов, предсказания потенциальных сбоев и улучшения эффективности системы. Работают над созданием отчетов и дашбордов, которые помогают другим участникам проекта принимать решения

Категория	Заинтересованные стороны	Роли и обязанности
Внешние заинтересованные стороны		
Государственные органы	Регуляторы, муниципальные службы	Предоставляют разрешения и лицензии, контролируют соблюдение законодательства в области строительства и эксплуатации зданий. Взаимодействуют с проектной командой для обеспечения соблюдения стандартов безопасности и устойчивости
Частные компании	Поставщики оборудования, подрядчики	Поставляют необходимые материалы и оборудование для проекта, реализующего концепцию. Подрядчики могут также участвовать в строительстве или модернизации объектов под нужды системы мониторинга
Местные сообщества	Жители района, местные предприятия	Заинтересованы в безопасности и надежности зданий и сооружений в их районе. Могут участвовать в обсуждениях и публичных слушаниях, касающихся реализации геотехнического мониторинга

Исходя из вышесказанного, концепция интеллектуальной системы геотехнического мониторинга должна основываться на реализации четырех фундаментальных аспектов, которые находят свое отражение в следующих принципах.

1. Тщательная разработка серверной инфраструктуры

Важное значение имеет правильное определение архитектурного подхода для создания модульной и расширяемой серверной инфраструктуры, которая способна адаптироваться к изменяющимся требованиям и объемам данных. Применение современных технологий, таких как облачные вычисления, виртуализация и контейнеризация, необходимо для обеспечения высокой доступности и надежности системы. Также использование передовых инструментов для управления конфигурацией, автоматизации развертывания и мониторинга состояния системы позволит сократить временные затраты на поддержку и управление инфраструктурой.

2. Интеграция датчиков и источников данных

Необходима интеграция разнообразных датчиков, включая акселерометры, тензодатчики и гидрологические сенсоры, которые обеспечивают сбор многоаспектных геотехнических данных в реальном времени. Также важна разработка надежных механизмов передачи данных, оптимизированных для работы в различных условиях и предусматривающих использование как проводных, так и беспроводных технологий связи.

3. Обработка и анализ данных

Применение алгоритмов глубокого обучения и нейронных сетей для анализа и интерпретации полученных данных, что позволяет выявлять закономерности, прогнозировать потенциальные сбои и оценивать риски. Использование технологий потоковой обработки для обеспечения быстрой реакции на изменения в данных и оперативного принятия решений. Как известно, потоковая обработка данных (streamprocessing) подразумевает непрерывное получение и обработку данных по мере их поступления. Это отличается от пакетной обработки, где данные собираются и обрабатываются партиями. Потоковая обработка позволяет мгновенно анализировать поступающие данные, обеспечивая актуальность информации.

4. Интерфейс и доступ к данным

Необходимо создание интуитивно понятных и многофункциональных пользовательских интерфейсов, которые облегчают визуализацию сложных данных и позволяют пользователям эффективно взаимодействовать с системой. Важное значение имеет реализация современных методов аутентификации и авторизации для обеспечения безопасности данных и контроля доступа к информации.

Модель функционирования интеллектуальной системы геотехнического мониторинга

Исходя из этих принципов, интеллектуальная система мониторинга должна функционировать следующим образом. Данные собираются через датчики, интегрированные с локальными модулями предварительной обработки, которые функционируют как интерфейсные устройства для передачи собранных метрик. Эти датчики активно отслеживают различные параметры, такие как вибрация, температура и давление, передавая собранные данные через модули для дальнейшей обработки.

Обработка сигналов включает в себя три ключевых этапа: усиление, фильтрация и преобразование. Эти процессы выполняются с использованием специализированных устройств, которые оптимизируют сигналы для повышения точности и устранения помех, обеспечивая надежность последующего анализа данных.

После первичной обработки локальные модули используют проводные и беспроводные технологии Wi-Fi для отправки данных на серверный модуль. Эта передача данных происходит в режиме реального времени, обеспечивая непрерывный поток информации для системной интеграции и анализа.

На сервере реализованы сложные алгоритмы для дальнейшей обработки данных. Эти алгоритмы включают сбор данных, их первичную обработку, аналитическую оценку и интеграцию с другими системными компонентами. Кроме того, серверы обеспечивают разработку и поддержку пользовательских интерфейсов, которые способствуют пользователям взаимодействовать с системой, настраивать параметры мониторинга и получать доступ к аналитическим данным.

Далее применяются статистические методы для определения базовых тенденций и аномалий в данных. Это включает расчет статистических показателей, таких как среднее значение, стандартное отклонение и вероятностные распределения.

Используются методы вероятностного моделирования для оценки рисков и вероятностей их реализации. Это может включать методы, такие как Монте-Карло симуляции или байесовские сети.

Алгоритмы машинного обучения и глубокого обучения анализируют данные для выявления сложных шаблонов и зависимостей, которые могут указывать на потенциальные риски. Модели могут включать нейронные сети, решающие деревья и ансамбли моделей для улучшения точности прогнозов.

Разработка динамических моделей для симуляции возможных сценариев разрушений и их влияния на структуру и окружающую среду. Это помогает в планировании мер по минимизации последствий потенциальных аварий.

На основе анализа и прогнозов формируются рекомендации по укреплению зданий, планы эвакуации и другие меры реагирования на чрезвычайные ситуации.

Систематическое обновление информации для всех заинтересованных сторон, включая управляющие органы, экстренные службы и общественность, о возможных рисках и стратегиях их минимизации.

В качестве примера, представим себе ситуацию, когда интеллектуальная система мониторинга используется для наблюдения за состоянием моста в сейсмоактивном регионе. На мосту установлены различные датчики, такие как акселерометры для измерения вибраций, тензодатчики для измерения деформаций, а также датчики температуры и влажности и, возможно, другие необходимые параметры. Эти датчики постоянно собирают данные и отправляют их на центральный сервер через беспроводные сети. На сервере используется технология потоковой обработки данных (подобная, например, ApacheKafka), которая позволяет обрабатывать поступающие данные мгновенно. Данные о вибрациях, деформациях и других параметрах анализируются обученной сетью в реальном времени. Если в процессе анализа система обнаруживает, что вибрации моста превысили допустимые пределы, то это может указывать на возможное повреждение конструкции или на начавшееся землетрясение. Тогда система автоматически генерирует предупреждение и отправляет уведомление ответственным лицам и аварийным службам. Если вибрации продолжают увеличиваться,

система может автоматически инициировать закрытие моста для предотвращения возможных аварий и обеспечения безопасности людей. В этом случае аварийные службы могут сразу приступить к проверке состояния моста и провести необходимые ремонтные работы. На основе собранных данных проводится анализ причин аномалий, что позволяет разработать меры для предотвращения подобных ситуаций в будущем.

На рисунке 3 показана более низкоуровневая модель функционирования интеллектуальной системы мониторинга состояния зданий и сооружений в формате Event-driven process chain (EPC) в среде ARIS для построения моделей рабочих процессов. Модель EPC эффективно поддерживает проектирование и анализ процессов на основе событий, что является критически важным для оптимизации работы и повышения адаптивности процесса мониторинга [6]. Как известно, моделирование рабочих процессов (Business Process Modeling) представляет собой метод системного анализа, направленный на улучшение эффективности и увеличение прозрачности организационных операций. Этот метод основан на процессном подходе к управлению, который включает в себя детальное описание рабочих процессов через их ключевые компоненты: действия, данные, события и материалы. Такое подробное описание обеспечивает глубокое понимание бизнес-процессов, выявление возможностей для их оптимизации и улучшения взаимодействия между участниками процесса [7, 8]. Модель рабочих процессов может быть представлена в графической или текстовой форме и служит для демонстрации логической связи между различными аспектами процессов. Это представление может отображать два основных состояния процесса: "as-is" (текущее состояние) и "to-be" (желаемое состояние после реализации предложенных улучшений). Систематическое моделирование рабочих процессов может осуществляться с использованием различных средств визуализации, таких как блок-схемы, диаграммы, таблицы и сценарии, которые помогают в анализе и планировании изменений [9, 10].

Как видно из рисунка 3, процесс мониторинга начинается с активации датчиков, которые осуществляют сбор первичных данных о состоянии объектов. Эти данные подвергаются усилению и фильтрации для улучшения их качества перед дальнейшей цифровой обработкой. Датчики, активированные при включении, начинают сбор необходимых параметров окружающей среды и состояния объекта. Эти данные включают, но не ограничиваются температурой, давлением, влажностью и вибрацией. Собранные аналоговые сигналы усиливаются и проходят через фильтры нижних частот для удаления шумов, что повышает точность данных перед их дальнейшей цифровой обработкой. Аналоговые сигналы преобразуются в цифровую форму с помощью АЦП, что позволяет выполнять дальнейшую обработку данных на микрокомпьютере локального модуля: локальный модуль обрабатывает цифровые данные, подготавливая их к передаче на сервер.

В этом же устройстве реализуется обратная связь через ЦАП для управления датчиками, позволяя корректировать их работу в реальном времени. Обработанные данные передаются на сервер через сетевые интерфейсы. На сервере данные записываются в базу данных и одновременно отображаются в пользовательском интерфейсе системы управления серверным ПО. Анализ предложенной модели позволил выявить потенциальные риски и возможные недостатки предложенной реализации концепции.

1. Слабое или отсутствующее интернет-соединение может прервать передачу данных на сервер, что нарушит мониторинг в реальном времени.
2. Работа сервера может быть нарушена по множеству причин, включая ошибки в работе плагинов серверного ПО, которые взаимодействуют с внешними устройствами и данными.
3. Необходимость постоянного обновления ядра и плагинов серверного ПО для поддержания совместимости и безопасности системы может стать проблемой. Альтернативно стабилизация на одной версии программного обеспечения может повысить устойчивость системы, но уменьшить её функциональность по мере устаревания компонентов.

В модели функционирования интеллектуальной системы геотехнического мониторинга, представленной на рисунке 3, учтены эти аспекты.

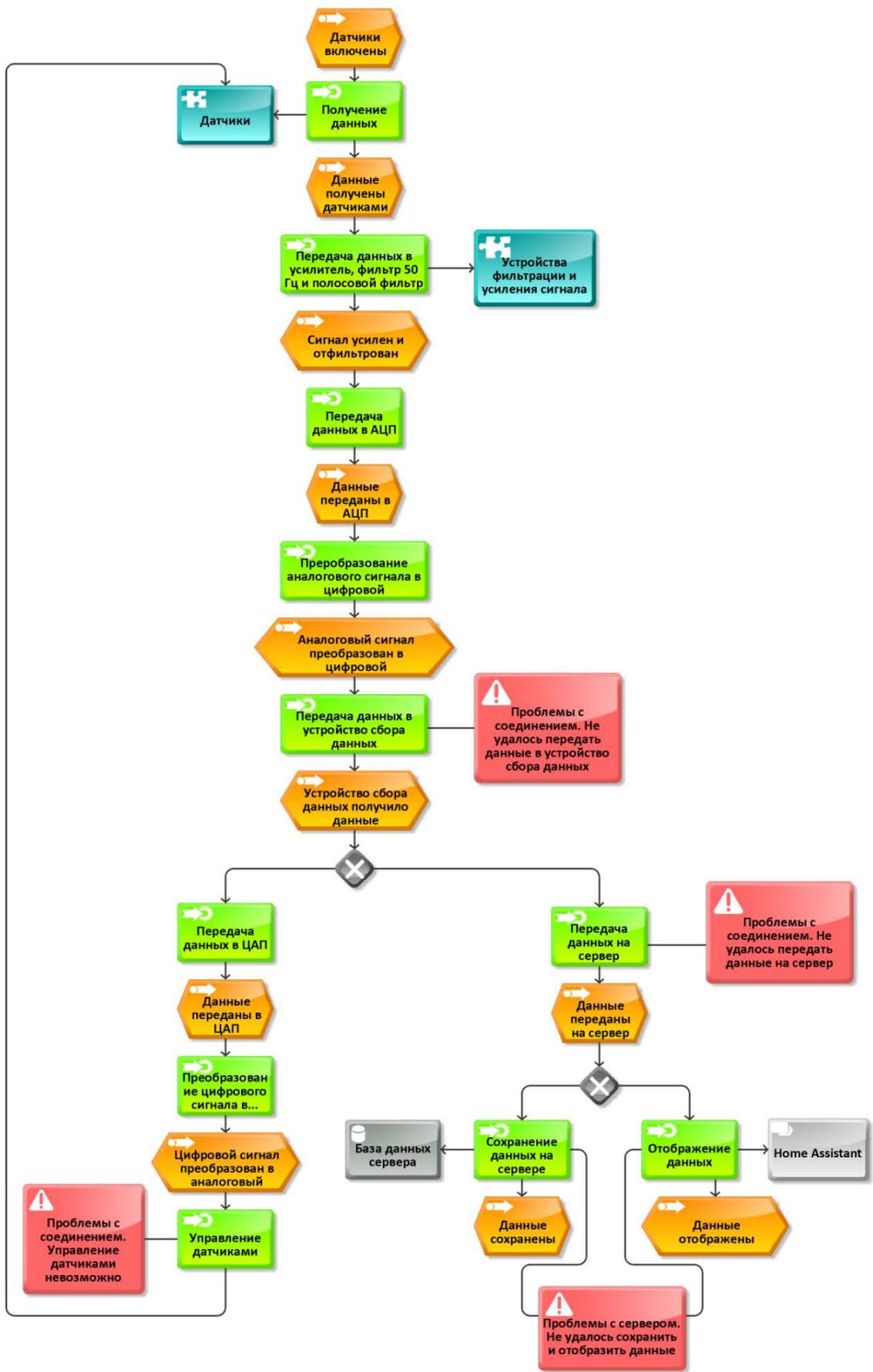


Рисунок 3 – Модель функционирования интеллектуальной системы геотехнического мониторинга

Заключение

Таким образом, был выполнен комплексный анализ применения интеллектуальных систем мониторинга. Как показал анализ, современная система геотехнического мониторинга предполагает использование разнообразных датчиков и сенсоров для отслеживания множества важных параметров, таких как вибрация, температура, влажность и давление, что позволяет своевременно реагировать на потенциальные угрозы. Особое внимание должно уделяться разработке масштабируемой серверной инфраструктуры и применению алгоритмов машинного обучения для предиктивного анализа данных, что является ключевым для прогнозирования рисков разрушений. Кроме того, особое внимание должно уделяться проблемам и рискам, связанным с передачей и обработкой данных, таких как потенциальные сбои в сетевых соединениях и работе серверов. Это подчеркивает необходимость обеспечения надежности системы через резервирование и использование отказоустойчивых технологий. На основе анализа можно сделать несколько рекомендаций по улучшению надежности и эффективности интеллектуальных систем геотехнического мониторинга:

1. Разработка унифицированных стандартов для интерфейсов датчиков и сенсоров для обеспечения их совместимости и взаимозаменяемости.
2. Использование гибридных облачных решений для обработки данных, что позволит увеличить масштабируемость и доступность системы.
3. Внедрение механизмов машинного обучения не только для анализа данных, но и для автоматического адаптивного управления ресурсами системы в ответ на изменения в оперативной обстановке.

Предложенные решения и рекомендации могут служить основой для дальнейшего совершенствования технологий в этой области, способствуя созданию более безопасной и устойчивой технологической среды.

Литература

1. Сейсмическая активность в Кыргызской Республике [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://seismo.kg/intensity_map/intensity_map.php (дата обращения: 15.06.2024).
2. Yavuz K., Şafak E. Real-Time Structural Health Monitoring and Damage Detection, 2013. DOI: 10.1007/978-1-4614-6555-3.
3. Caballero-Russi D., Ortiz A.R., Guzmán A., Canchila C. Design and Validation of a Low-Cost Structural Health Monitoring System for Dynamic Characterization of Structures // Applied Sciences. 2022. Т. 12. Стр. 2807. DOI: 10.3390/app12062807.
4. Chang C.-M., Lin T.-K., Chang C.-W. Application of neural network models for structural health monitoring based on derived modal properties // Measurement. 2018. Т. 129. DOI: 10.1016/j.measurement.2018.07.051.
5. Olajiga O., Ani E., Olu-lawal K., Montero D., Adeleke A. INTELLIGENT MONITORING SYSTEMS IN MANUFACTURING: CURRENT STATE AND FUTURE PERSPECTIVES // Engineering Science & Technology Journal. 2024. Т. 5. Стр. 750-759. DOI: 10.51594/estj.v5i3.870.
6. Фатрелл Р.Т., Шафер Д.Ф., Шафер Л.И. Управление программными проектами: достижение оптимального качества при минимуме затрат. – 2003. – 1125 с.
7. Грекул В.И., Коровкина Н.Л., Куприянов Ю.В. Проектное управление в сфере информационных технологий. – 2015.
8. Архипенков С. Лекции по управлению программными проектами. – 2009. – 128 с.
9. Силич М.П. Моделирование и анализ бизнес-процессов: учебное пособие. – Томск, 2011.
10. Морозова В.И., Врублевский К.Э. Моделирование бизнес-процессов с использованием методологии ARIS: учебно-методическое пособие. – Москва, 2017.