

**РАЗРАБОТКА АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАТЧИКА УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА ДЛЯ ТОЧНЫХ
ПОКАЗАНИЙ В ЛЕСУ**

**Мокринский А.А. (СПбГЛТУ), Бажунов И.Д. (СПбГЛТУ)
Научный руководитель – ассистент Бойцов А.К. (СПбГЛТУ)**

Введение.

Лесные экосистемы играют ключевую роль в поддержании углеродного баланса на планете, выступая естественными поглотителями углекислого газа. В условиях глобальных инициатив по декарбонизации и борьбы с изменением климата особенно важно обеспечивать эффективный мониторинг углеродного цикла в лесах. Ускоряющийся рост концентрации CO_2 в атмосфере, вызванный антропогенной активностью (сжигание топлива, обезлесение, производственные процессы), оказывает серьёзное влияние на экологическое состояние планеты.

Система мониторинга лесных экосистем, разработанная Центром экологических исследований имени Гельмгольца [1], объединяет дистанционное зондирование и наземные сенсоры для оценки состояния листвы, почвы, погодных условий и других параметров. Однако такой подход не учитывает влияние рельефа и плотности лесных массивов на стабильность передачи данных. В Иране для мониторинга горных лесов используют комбинацию данных с дронов и спутников [2]. Это решение улучшает оценку состояния экосистем, но не рассматривает влияние растительности на качество радиосигнала. Спектральные методы, применяемые в Индии, позволяют отслеживать состояние лесов в экстремальных климатических условиях [3]. Однако проблемы с передачей данных в таких условиях остаются нерешёнными. В России для оценки углеродного баланса и мониторинга выбросов парниковых газов активно развивается сеть карбоновых полигонов и карбоновых ферм [4]. Эти исследовательские площадки позволяют фиксировать потоки углекислого газа и метана в режиме реального времени, а также анализировать биохимические процессы в почве и динамику углеродного цикла.

Несмотря на достижения существующих решений по мониторингу углекислого газа в труднодоступных местах, остаются нерешённые вопросы: стабильность передачи данных в сложных условиях, энергоэффективность и адаптация к особенностям лесного микроклимата. Разработка аппаратно-программного комплекса, учитывающего эти аспекты и создать более надёжную систему мониторинга.

Основная часть.

Для обеспечения качественной реализации аппаратно-программного комплекса выделены основные компоненты комплекса: узел — сбор данных, брокер — отправка данных, сервер — обработка и структурирование данных, администратор — управление основными параметрами сервера и результатами работы. Основные компоненты масштабируются следующим образом: узел включает датчики, мастер-датчик, протоколы передачи данных и коммуникационные модули; брокер содержит облачное хранилище и модули управления; сервер включает модули управления и обработчик запросов; администратор обладает механизмами анализа и обработки данных.

Для оценки эффективности разработанного комплекса на опытных объектах Ленинградской области проведено исследование уровня сигнала. При проведении измерений учитывались такие характеристики лесных насаждений, как ярусность, наличие подстилки и подлеска, видовой состав деревьев, полнота насаждений, высота и диаметр стволов, а также присутствие потенциальных препятствий для распространения радиосигнала. Высота деревьев измерялась с помощью высотомера, а диаметр мерной вилкой. Измерения сигнала проводились с использованием беспроводных устройств и технологии Wi-Fi на частоте 2,4 ГГц. Для повышения точности моделирования на всех участках предлагался комбинированный подход, включающий метод Буллингтона, известный своей способностью анализировать вертикальные препятствия, в сочетании с численными методами. Такой подход

позволяет учитывать сложность геометрии древостоя и подлеска, обеспечивая высокую точность моделирования и адаптацию к уникальным особенностям каждого лесного участка.

Результаты полевых исследований и анализа параметров древостоя подтвердили необходимость создания надёжного аппаратно-программного комплекса, способного эффективно осуществлять мониторинг концентрации CO₂ и оценивать состояние лесных экосистем. Для повышения точности измерений требуется использование датчиков с высокой чувствительностью и устойчивостью к изменениям окружающей среды. Кроме того, при передаче данных необходимо учитывать возможные зоны отсутствия сигнала из-за наличия большого количества препятствий. Учитывая выявленные в ходе полевых исследований условия и требования к стабильности передачи данных, разработка аппаратно-программного комплекса направлена на создание надёжной системы для мониторинга концентрации CO₂ и оценки состояния лесных экосистем. В аппаратную часть входят датчики MQ-135 и MQ-2 для измерения концентрации углекислого газа и других газов, коммуникационные модули ESP8266 и SIM800, и MQTT-брокер. Управляющим элементом комплекса выступает платформа Arduino Nano, которая координирует сбор и передачу данных.

Для обеспечения надёжной работы системы в удалённых лесных зонах особое внимание уделено оптимизации энергопотребления. Проведённое исследование показало, что применение режима глубокого сна для всех компонентов и настройка оптимальных интервалов передачи данных позволяют значительно снизить энергозатраты комплекса. В результате удалось уменьшить энергопотребление на 60-70%, что увеличивает продолжительность функционирования системы до 18 часов на аккумуляторах типа AA, тогда как традиционные конфигурации с постоянной передачей данных через GSM или Wi-Fi ограничивают время работы до 3-4 часов.

Программная часть комплекса разрабатывается для удалённого управления и мониторинга данных с датчиков. Основное устройство системы оснащено сервисами для управления питанием, сетевыми подключениями и другими подсистемами. Доступ к настройкам системы осуществляется через два интерфейса: командную строку и веб-интерфейс, что обеспечивает гибкость в управлении и настройке параметров оборудования. Для реализации кластерной архитектуры разработано программное обеспечение, обеспечивающее централизованный сбор и обработку данных. Обмен данными между микроконтроллерами и контрольными узлами осуществляется с использованием протокола MQTT, который отличается эффективностью при передаче небольших объёмов данных с минимальной задержкой, что особенно важно при ограниченной пропускной способности сети и возможных перебоях связи.

Выводы. Разработанный аппаратно-программный комплекс обеспечивает высокую точность измерений концентрации углекислого газа в лесной среде благодаря использованию специализированных датчиков, адаптированных к условиям лесных экосистем, и программной части, обеспечивающей удалённое управление и мониторинг.

Список использованных источников:

1. Lausch A. et al. Understanding forest health with remote sensing, part III: requirements for a scalable multi-source forest health monitoring network based on data science approaches. *Remote Sens* 10: 1120. – 2018.
2. Ghasemi M., Latifi H., Pourhashemi M. Integrating UAV and Freely Available Space-Borne Data to Describe Tree Decline Across Semi-Arid Mountainous Forests // *Environmental Modeling & Assessment*. – 2024. – Т. 29. – №. 3. – С. 549-568.
3. Gupta S. K., Pandey A. C. Spectral aspects for monitoring forest health in extreme season using multispectral imagery // *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. – 2021. – Т. 24. – №. 3. – С. 579-586.
4. Аналитический обзор методик учёта выбросов и поглощения лесами парниковых газов из атмосферы / А. Н. Филиппчук, Н. В. Малышева, Б. Н. Моисеев, В. В. Страхов // *Лесохозяйственная информация*. – 2016. – № 3. – С. 36-85. – EDN WMDQSD

Автор _____ Мокринский А.А.

Научный руководитель _____ Бойцов А.К.