

А.А. Кочкаров, А.К. Куликов, В.М. Мацакова

УНИВЕРСАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЗАМКНУТЫМИ АГРОПРОИЗВОДСТВАМИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ИИ

Актуальность исследования обусловлена противоречием между необходимостью наращивания производства продовольствия в условиях урбанизации и фрагментарностью существующих высокотехнологичных решений (гидропоника, аэропоника, IoT), которые внедряются изолированно, без единой методологии управления. Отсутствие унифицированных подходов к сбору данных и адаптивному контролю параметров среды ограничивает масштабирование вертикальных ферм. Цель работы – разработка и теоретическое обоснование архитектуры универсальной модели адаптивного управления замкнутыми агропроизводствами, интегрирующей различные методы культивации на базе алгоритмов машинного обучения. Методология базируется на систематическом анализе научных публикаций и экспериментальных данных по применению встраиваемых устройств и алгоритмов машинного обучения в гидропонных, аэропонных и грунтовых вертикальных теплицах. На основе синтеза данных построены параметрические матрицы для унификации технологических процессов. Основные результаты включают разработку структурной схемы универсальной модели, обеспечивающей интеграцию разнородных систем в единую платформу с возможностью непрерывного мониторинга и предиктивной аналитики. Обоснован минимально необходимый комплект датчиков: pH, ЕС, температуры, влажности, CO₂, PAR, давления и расхода питательного раствора. Предложенная архитектура позволяет динамически переключать режимы гидропоника, аэропоника и закрытого грунта в рамках одного фитотрона. Выводы и значимость работы заключаются в создании основы для проектирования масштабируемых вертикальных ферм с прогнозируемыми показателями рентабельности и ресурсоэффективности, обеспечивая непрерывное дообучение алгоритмов ИИ для предиктивного управления микроклиматом и ранней диагностики заболеваний растений в городских условиях.

Вертикальное фермерство; гидропоника; аэропоника; системы закрытого грунта; искусственный интеллект; автоматизация агропроизводства; интернет вещей (IoT); машинное обучение (ML); урожайность; энергоэффективность; датчики мониторинга.

A.A. Kochkarov, A.K. Kulikov, V.M. Matsakova

A UNIVERSAL MODEL OF ADAPTIVE MANAGEMENT OF CLOSED AGRICULTURAL PRODUCTION USING AI TECHNOLOGIES

The relevance of this research stems from the contradiction between the need to increase food production in an urbanized environment and the fragmentation of existing high-tech solutions (hydroponics, aeroponics, IoT), which are being implemented in isolation, without a unified management methodology. The lack of unified approaches to data collection and adaptive control of environmental parameters limits the scalability of vertical farms. The goal of this research is to develop and theoretically substantiate the architecture of a universal adaptive management model for closed-loop agricultural production systems, integrating various cultivation methods based on machine learning algorithms. The methodology is based on a systematic analysis of scientific publications and experimental data on the use of embedded devices and machine learning algorithms in hydroponic, aeroponic, and soil-based vertical greenhouses. Based on this data synthesis, parametric matrices were constructed to standardize technological processes. The main results include the development of a structural diagram of a universal model that enables the integration of disparate systems into a single platform with the ability to continuously monitor and perform predictive analytics. The minimum required sensor set is substantiated: pH, EC, temperature, humidity, CO₂, PAR, pressure, and nutrient solution flow. The proposed architecture enables dynamic switching between hydroponic, aeroponic, and indoor modes within a single phytotron. The conclusions and significance of this work lie in creating a foundation for designing scalable vertical farms with predictable profitability and resource efficiency indicators, while enabling continuous further training of AI algorithms for predictive microclimate management and early plant disease detection in urban environments.

Vertical farming; hydroponics; aeroponics; indoor soil systems; artificial intelligence; automation of agricultural production; Internet of Things (IoT); machine learning (ML); yield; energy efficiency; monitoring sensors.

Введение. Современное вертикальное фермерство сталкивается с фундаментальной проблемой: существующие высокотехнологичные методы культивации (гидропоника, аэропоника, закрытый грунт) развиваются изолированно, каждый со своей системой управления и набором датчиков. Это приводит к отсутствию унифицированных подходов к сбору данных, адаптивному контролю параметров среды и, как следствие, к низкой экономической устойчивости и затруднённому масштабированию таких производств [1]. Мировой рынок вертикальных ферм оценивается в 8,3–8,7 млрд долларов, а российский – в 55–65 млн долларов с ежегодным ростом 25% [2], однако фрагментарность решений сдерживает их широкое внедрение.

Современные исследования демонстрируют, что интеграция встраиваемых устройств и алгоритмов машинного обучения позволяет значительно повысить эффективность управления параметрами выращивания [3–5]. Использование микроконтроллеров ESP32 и Raspberry Pi обеспечивает энергоэффективный сбор данных и передачу их в облачные платформы, такие как Blynk и ThingsBoard, что даёт возможность удалённого мониторинга и автоматизации [4, 6]. В гидропонных и аэропонных системах ключевым фактором успеха является точный контроль состава питательного раствора (pH, EC, TDS) и параметров микроклимата [7, 8]; для аэроponики дополнительно требуется управление дисперсностью аэрозоля (20–100 мкм) [9, 10]. Компьютерное зрение и методы машинного обучения (Random Forest, SVR) уже применяются для диагностики заболеваний растений по цвету и текстуре листьев, а также для прогнозирования урожайности [5, 11, 12].

Несмотря на очевидные преимущества встраиваемых систем и машинного обучения, остаются открытыми вопросы совместимости устройств, безопасности данных и отсутствия единых протоколов [1]. Анализ доступных коммерческих решений и патентных разработок (RU196013U1, RU199457U1) показывает, что в настоящее время не существует универсальной климатической камеры, позволяющей переключать режимы гидроponики, аэроponики и закрытого грунта без изменения базовой конструкции установки.

Цель настоящей работы – разработка и теоретическое обоснование архитектуры универсальной модели адаптивного управления замкнутыми агропроизводствами, интегрирующей различные методы культивации на основе алгоритмов машинного обучения.

Научно-техническая задача. Разработать и обосновать архитектуру программно-аппаратного комплекса (гибридного фитотрона), реализующего универсальную модель адаптивного управления замкнутыми агропроизводствами. Комплекс должен обеспечивать возможность динамического переключения между гидропонным, аэропонным и грунтовым (субстратным) способами выращивания в рамках одной установки без изменения её базовой конструкции. Для этого необходимо:

1. Провести сравнительный анализ параметров микроклимата и питательной среды, характерных для каждого метода культивации, и определить минимально необходимый набор сенсоров;
2. Разработать структурную схему унифицированной системы сбора данных и адаптивного управления, интегрирующую разнородные исполнительные устройства. Решение поставленной задачи позволит создать масштабируемую платформу для автоматизированного агропроизводства с повышенной эффективностью использования ресурсов и адаптацией к различным культурам и условиям.

Материалы и методы. Будет проведен сравнительный анализ современных методов автоматизации, таких способов выращивания растений в вертикальных теплицах как гидропоника, аэропоника и закрытый грунт. Критериями сравнения являются: технологическая сложность, энергоёмкость и урожайность.

Гидропонные системы. Гидропонные системы рис. 1. представляют собой сложную инфраструктуру, включающую множество взаимосвязанных компонентов, таких как насосы, трубы, субстраты и программное обеспечение для автоматизации. Каждый из этих элементов играет ключевую роль в обеспечении точного контроля над условиями роста растений, что делает гидроponику особенно подходящей для городских условий и вертикального земледелия [7]. Современные технологии позволяют автоматизировать управление этими процессами через использование микроконтроллеров и встраиваемых систем, таких как датчики pH, электропроводности (EC) и температуры [6].

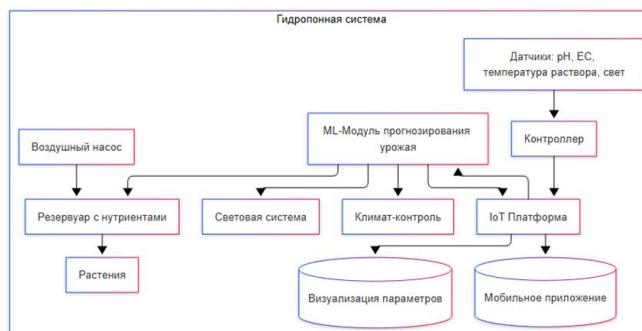


Рис. 1. Структурная схема гидропонной системы

Например, мобильные приложения могут регулировать работу насосов и дозирующих устройств на основе данных, полученных от датчиков, что значительно снижает зависимость от человеческого фактора. Однако внедрение таких технологий требует значительных начальных инвестиций и технической экспертизы, что увеличивает общую сложность установки и эксплуатации гидропонных систем по сравнению с традиционными методами выращивания [13]. Сравнительный анализ показывает, что гидропонные системы потребляют на 90% меньше воды по сравнению с традиционным земледелием благодаря рециркуляции и минимизации потерь [14]. Тем не менее, такие системы остаются энергоемкими, особенно когда используются искусственное освещение и климат-контроль. Важно отметить, что автоматизация процессов управления питательными веществами и мониторинг параметров, таких как pH и ЕС, может значительно снизить риск ошибок, связанных с человеческим фактором. Однако обслуживание и калибровка датчиков остаются критически важными задачами, поскольку любые сбои могут привести к серьезным проблемам, таким как дисбаланс питательных веществ или заражение корней [6]. Таким образом, хотя гидропонные системы предлагают значительные экологические и экономические преимущества, их технологическая сложность остается существенным препятствием для широкого распространения, особенно среди мелкомасштабных фермеров. Для преодоления этих барьеров необходимы дальнейшие исследования в области снижения энергопотребления и разработки более доступных решений для автоматизации.

Аэропонные системы. Аэропонные системы представляют собой инновационный подход к выращиванию растений, при котором корни подвешиваются в воздухе и орошаются питательным раствором через распылители. В основе их эффективности лежит точный контроль за условиями окружающей среды, что обеспечивает высокую урожайность и снижение потребления воды [9].

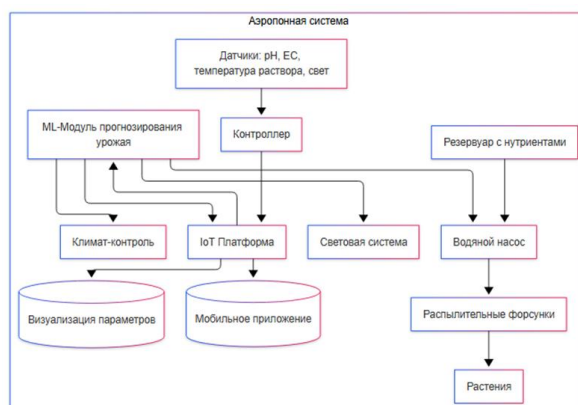


Рис. 2. Структурная схема аэропонной системы

Однако для успешной реализации таких систем требуется сложное оборудование, регулярное техническое обслуживание и значительные начальные инвестиции. Для работы аэропонных систем необходим ряд специализированных устройств, включая распылители, насосы высокого давления, датчики контроля параметров окружающей среды и системы автоматизации. Системы мониторинга и управления также являются неотъемлемой частью аэропоники. Современные технологии, включая IoT, нейронные сети и сенсорные системы, позволяют контролировать такие параметры, как уровень pH, температура, влажность и концентрация питательных веществ. Например, использование компьютерных технологий позволяет своевременно обнаруживать механические и биологические проблемы, предотвращая повреждение растений [9]. Тем не менее, зависимость от электричества и высокая стоимость оборудования остаются значительными препятствиями для широкого внедрения аэропоники, особенно в условиях ограниченного бюджета.

Системы закрытого грунта. Автоматизация в системах закрытого грунта представляет собой сложный процесс, объединяющий передовые технологии управления климатом, орошением, питательными средами и освещением на рис. 3. В последние годы значительное внимание уделяется интеграции искусственного интеллекта (ИИ), интернета вещей (IoT) и роботизированных решений для повышения урожайности и оптимизации использования ресурсов [3].

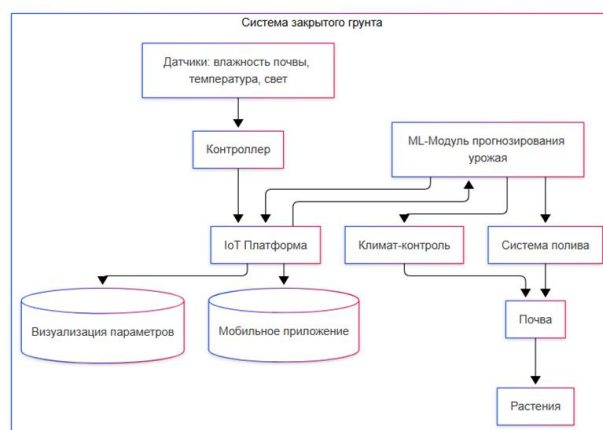


Рис. 3. Структурная схема систем закрытого грунта

Эти технологии позволяют создавать высокопроизводительные системы, способные работать в условиях ограниченного пространства и изменчивых внешних условий, что особенно важно для мелкомасштабных ферм и городского сельского хозяйства. Одним из ключевых преимуществ автоматизации является снижение зависимости от ручного труда. Например, компания Zordi разработала полностью автоматизированные тепличные системы, которые уменьшают потребность в человеческом участии на 80% [15]. Их решения включают точный контроль параметров микроклимата, автоматизированное орошение и доставку питательных веществ, а также использование ИИ для анализа данных в реальном времени. В развитых странах, таких как Нидерланды и США, автоматизация широко применяется в крупных коммерческих теплицах. Например, проект Autonomous Greenhouses Challenge демонстрирует практическую применимость ИИ-технологий в реальных условиях [3].

Таким образом, по результатам анализа были выявлены плюсы и минусы различных подходов к вегетации. На сегодняшний день, есть общая концепция контролируемого земледелия, в англоязычной литературе концепция называется CEA (Controlled Environment Agriculture). Концепция CEA имеет следующие принципы:

1. Принцип оптимизации факторов роста растений. Создание и поддержание идеальных (заданных) значений для каждого фактора роста в течение всего жизненного цикла растения.

2. Принцип изоляции от внешней среды. Создание физического барьера, минимизирующего влияние неконтролируемых внешних факторов (погода, вредители, болезни, загрязнения).

3. Принцип ресурсной эффективности и устойчивости. Максимизация продуктивности на единицу потребляемых ресурсов (вода, удобрения, площадь).

4. Принцип автоматизации и управления на основе данных. Использование систем сбора данных (сенсоры) и автоматического управления (АСУ ТП) для минимизации человеческого фактора и принятия оптимальных решений.

Кроме этого, систематизированы результаты исследования климатических камер для выращивания растений доступных к приобретению.

Таблица 1

Климатические камеры для выращивания растений

Модель	Тип / Назначение	Основные характеристики (включая освещение)
Фитотрон ЛиА-1	Климатическая камера (фитотрон)	Температура (день): +10...+30°C; Температура (ночь): +5...+25°C; Точность: $\pm 2^\circ\text{C}$; Габариты (ШхГхВ): 800х725х2050 мм; Вес: до 140 кг; Питание: 220В, до 1,2 кВт; Освещение: 2 светодиодные панели.
Фитотрон ЛиА-2	Климатическая камера (фитотрон)	Температура (день): +10...+30°C; Температура (ночь): +5...+25°C; Точность: $\pm 2^\circ\text{C}$; Габариты (ШхГхВ): 1600х725х2050 мм; Вес: до 220 кг; Питание: 220В, до 1,2 кВт; Освещение: 4 светодиодные панели.
КК 500 FIT P	Климатическая камера с фитотронной системой	Объем: 470 л (общий), 365 л (полезный); Температура: 0...+60°C (со светом +10...+50°C); Габариты (ШхГхВ): 65х199х104 см; Мощность: 2140 Вт (ном.); Напряжение: 230 В, 50 Гц; Контроллер: Smart PRO; Освещение: световая панель с лампами дневного света (спектр для растений), есть разъемы для доп. панелей.
Климатические камеры (Фитотрон) [модель не указана]	Климатическая камера (фитотрон)	Объем: 250 л; Температура: -5...+50°C; Материал камеры: нержавеющая сталь; Особенности: контроль влажности грунта, многозонный мониторинг, 4 съёмные полки, двойные двери; Освещение: светодиодное, с изменяемым спектром и интенсивностью, многозонное.
FitoClima 600-1200HP LED	Камера роста растений	На странице каталога подробные технические характеристики отсутствуют. Освещение: светодиоды, спектр AP67 (Valoya) для роста и цветения.
FitoClima Walk-in (PL/PLH)	Проходная камера / комната (несколько уровней)	Температура (свет вкл): +5...+45°C; Температура (свет выкл): -5...+45°C; Влажность (свет вкл/выкл): 40-80% / 40-90%; Точность темп./влажн.: $\pm 0,5^\circ\text{C}$ / $\pm 1\%$; Внутренняя площадь полок: от 4,5 до 18 м²; Расход воздуха: горизонтальный ламинарный поток, 0,3-1 м/с; Питание: 3-фазное, 400В; Освещение: от флуоресцентных до светодиодов (до 600 мкмоль/м²/с), регулировка 10-100%.

VeFarm Clima Pro	Климатическая камера (фитотрон) для образования	Особенности: автоматический полив, вентиляция, сигналы тревоги, построение графиков; Освещение: независимое освещение на трёх полках.
АгроЛаб МОДУЛЬ	Лаборатория агробиотехнологий	Габариты модуля управления: 695х1315х655 мм; Габариты модуля выращивания: 1900х1800х655 мм; Материалы: нержавеющая сталь, алюминий; Питание: 220 В; Особенности: 4 климатические зоны, поддержка до 40 экспериментов, 10 линий полива, охлаждение (-5°C), видеонаблюдение; Освещение: полноспектральный светильник "Искусственное солнце".
ECODOX ED	Агролаборатория (учебная гидропонная система)	Габариты (ДхШхВ): 650х600х410 мм; Вес: 15 кг; Питание: 220 В; Потребление: 80 Вт; Особенности: программирование (Arduino), изучение гидропоники; Освещение: LED-светильники.
Климатокамера ФИТОТРОН (Россия)	Климатическая камера (фитотрон)	Температура: до +60°C; Точность: $\pm 1^\circ\text{C}$; Неравномерность: $\leq 2,5^\circ\text{C}$; Освещенность: 0–10 000 Люкс (ступенчатая); Питание: 220 В, 500 Вт; Управление: ЖК-дисплей, до 3 программ.
Fitoclima 12000 / 600 (Aralab)	Проходные камеры для выращивания растений	Объем: 12 000 л и 6 000 л; Температура: 0...+45°C; Влажность: 40–90%; Освещение: 2 уровня освещения; Особенности: капельное орошение с дозированием растворов.
Fitotron SGC1700	Камера роста растений	Объем: 1658 л; Внутренние размеры (ШхГхВ): 1400х800х1480 мм; Температура (свет вкл): +7...+40°C; Температура (свет выкл): 0...+40°C; Влажность: 25–95%; Освещение: 20 люминесцентных ламп (диммируемые) + 8 ламп накаливания, макс. 900 мкмоль/м ² /с; Питание: 380-440 В, 3 фазы.
Автоматизированная система (фитотрон) на базе ОВЕН (Россия)	Система для селекции и исследований	Температура: 0...+50°C; Влажность: 30–90%; Освещение: регулируемое, с соотношением синего/красного спектра; Автоматизация: воздухообмен, полив, сценарии "весна-лето-осень".
Fitotron HGC 1514 LED	Модульная климатическая камера	Площадь культивации: 1,5 м ² ; Высота роста: до 1,6 м; Температура: -10...+40°C (с имитацией заморозков); Освещение: диммируемые светодиоды с симуляцией спектра дневного света, до 1000 мкмоль/м ² /с; Управление: сенсорные панели + ПО SIMPATI для удаленного контроля.

Также, были систематизированы данные по климатическим камерам способные поддерживать выращивание растений на основе методов аэропоники и гидропоники. В рамках открытых источников информации сети Интернет не было найдено коммерчески доступного лабораторного оборудования. В российских патентных разработках последних лет представлены интересные решения, совмещающие фитотроны с гидро- и аэропоники. Например, патент RU196013U1 описывает специализированный аэропонный фитотрон с герметичными камерами для корней, системой охлаждения и обеззараживания

питательного раствора, а также тензометрическими датчиками для непрерывного мониторинга массы растений в ходе экспериментов. Другая полезная модель, RU199457U1, предлагает универсальный фитотрон-трансформер, который благодаря особой конструкции лотков-ярусов может быть обратимо превращен из аэропонного в гидропонный режим простым их переворачиванием; устройство также оснащено системой регистрации динамики роста для сравнительного анализа. Кроме того, известен бытовой фитотрон RU49420U1, предназначенный для гидропонного выращивания и содержащий вращающуюся стойку с лотками для равномерного освещения растений и даже устройство для создания радуги

Таким образом, коммерчески доступной разработки, которая бы позволяла осуществлять всесторонний контроль над растением вне зависимости от способа выращивания на текущий момент времени нет

Результаты. Сравнение сложности настройки и поддержания систем закрытого грунта с другими методами выращивания, такими как гидропоника и аэропоника, показывает, что каждая из них имеет свои особенности. Гидропонные системы обеспечивают высокую урожайность благодаря возможности многократных сборов урожая круглый год [5]. Однако они требуют точного контроля над питательными растворами и уровнем pH, что увеличивает сложность их эксплуатации. Аэропоника, с другой стороны, позволяет сократить потребление воды на 95% по сравнению с традиционным земледелием, но её установка и обслуживание могут быть более затратными из-за необходимости высокотехнологичного оборудования [5]. Закрытый грунт занимает промежуточное положение, сочетая относительную простоту настройки с возможностью адаптации к различным условиям выращивания. Влияние автоматизации на повышение урожайности особенно заметно при выращивании цветов и овощей. Согласно исследованию Cornell University, доходы от использования инновационных технологий в закрытом грунте могут превышать доходы традиционного сельского хозяйства в 4000 раз [5]. Примером успешной реализации является компания Gotham Greens, чьи теплицы на крышах производят 90 тыс. кг. овощей ежегодно, заменяя 400 тыс. кв.м. обычных полей. Автоматизация позволяет минимизировать воздействие на окружающую среду за счет снижения потребления воды и удобрений. Например, системы капельного орошения, управляемые датчиками влажности почвы, могут сократить потребление воды на 50%. Несмотря на значительные преимущества, автоматизация в системах закрытого грунта сталкивается с рядом вызовов. Одной из основных проблем является обеспечение безопасности данных IoT-устройств, так как существует риск несанкционированного доступа и кибератак. Для защиты систем предложены многоуровневые протоколы безопасности, включающие шифрование данных и использование блокчейн-технологий. Кроме того, необходимы дальнейшие исследования для совершенствования технологий автоматизации и повышения их экологической устойчивости [3, 16, 17]. Таким образом, автоматизация систем закрытого грунта представляет собой мощный инструмент для повышения урожайности и устойчивости сельского хозяйства [18]. Однако её успешное внедрение требует учета региональных особенностей, экономических факторов и технологических ограничений.

За счет динамичного развития элементной базы вычислительных систем и их общей тенденции к миниатюризации, это оказывает катализирующую роль в области объединения различных подходов выращивания в рамках единого контура универсальной модели адаптивного управления замкнутыми агропроизводствами с целью создания универсальной климатической камеры со сменяемыми видами выращивания растений.

На текущей стадии развития за счет анализа различных источников можно выделить основные параметры анализа различных видов выращивания культур табл. 2 и собрать в единую структурную схему рис. 4.

Концептуальная архитектура системы рис. 4, предназначенная для унификации управления тремя различными методами культивации: гидропоникой, аэропоникой и закрытым грунтом. Схема имеет иерархическое строение и состоит из следующих ключевых уровней и блоков: Уровень объектов управления и сенсорики. В схеме расположены три блока, соответствующие различным методам выращивания: Гидропоника[19], Закрытый

грунт [20] и Аэропоника [21]. Внутри каждого блока подразумевается наличие физических объектов: растений, резервуаров с питательным раствором, субстрата, климатической камеры. Данные от всех трех типов систем стекаются в единый центр для первичной обработки. Таким образом, первый уровень решает задачу гетерогенного сбора данных.

Таблица 2

Параметры анализа различных видов выращивания культур

	Гидропоника	Аэропоника	Закрытый грунт
Температура воздуха	☐	☐	☐
Влажность воздуха	☐	☐	☐
Уровень CO ₂	☐	☐	☐
Интенсивность света (PPFD)	☐	☐	☐
pH раствора / почвы	☐	☐	☐
ЕС (электропроводность)	☐	☐	☐
TDS (общие растворённые соли)	☐	☐	—
Температура раствора	☐	☐	—
Уровень питательного раствора	☐	☐	—
Частота и время атомизации	—	☐	—
Влажность почвы	—	—	☐
Температура почвы	—	—	☐
Структура и состав почвы	—	—	☐
Цвет и состояние листьев	☐	☐	☐
NDVI / индекс растительности	☐	☐	☐

Уровень унификации данных и первичного анализа: Центральный блок "Контроллер" играет роль агрегатора. Он принимает разнородные сигналы: От гидропоники: pH, ЕС, TDS, температура и уровень раствора; От аэропоники: все параметры гидропоники плюс критически важные частота и время атомизации, а также давление в системе; От закрытого грунта: влажность, температура и структура почвы.

Кроме того, существуют общие для всех систем параметры (температура/влажность воздуха, CO₂, освещение PAR, данные технического зрения), которые также поступают в этот блок. Блок выполняет функцию нормализации и структурирования данных, приводя их к единому формату, пригодному для анализа. Он является интерфейсом между аппаратной частью системы и программной частью системы.

Уровень обработки и принятия решений: Блок – "ML модуль". Он получает унифицированные данные из предыдущего блока. Внутри этого блока реализованы следующие функции: Предиктивная аналитика: Использование моделей (регрессия, SVR, Random Forest) для прогнозирования урожайности, скорости роста, риска заболеваний. Кластеризация и поиск паттернов: Выявление скрытых зависимостей между параметрами среды и состоянием растений для разных методов выращивания. Обучение и адаптация: Непрерывное дообучение моделей по мере накопления экспериментальных данных. Этот блок принимает решение о том, какие параметры и как необходимо скорректировать.

Уровень управления и исполнения:

Решения, принятые блоком ML, передаются на блок "Контроллер", для генерации конкретных управляющих сигналов для исполнительных устройств. Именно здесь происходит реализация принципов СЕА и специфических принципов для каждого типа выращивания. Сигналы от "Адаптивного управления" направляются обратно к трем типам систем (замыкая контур управления).

Схема подразумевает, что управление может быть как прямым, так и косвенным, влияющим на общие для всех систем параметры.

Структурная схема представленная на рис. 4. может быть реализована с использованием следующих датчиков, представленных в табл. 3.

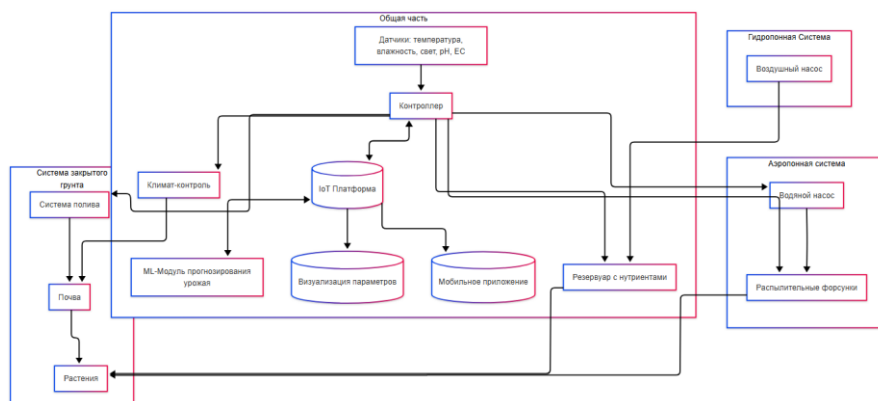


Рис. 4. Структурная схема универсальной модели адаптивного управления замкнутыми агропроизводствами

Таблица 3

Типы датчиков для унифицированной системы выращивания растений

Параметр	Датчик	Описание
Температура воздуха/ почвы	DS18B20	Цифровой температурный датчик с высокой точностью
Влажность воздуха	DHT22	Комбинированный датчик температуры и влажности
pH раствора / почвы	Atlas Scientific pH Probe или аналог YFS-201	Высокоточный цифровой датчик pH
Электропроводность (EC)	Gravity EC Sensor V2.0 или EC-5	Измеряет уровень растворенных солей
Уровень воды / раствора	Ультразвуковой датчик HC-SR04 или поплавковый датчик	Контроль уровня жидкости в резервуаре
TDS (общее количество растворённых солей)	Gravity TDS Sensor	Связан с EC, используется в воде
CO ₂	MH-Z19B	Измеряет концентрацию углекислого газа
Свет (PPFD)	PAR-сенсор Apogee MQ-500	Измерение фотосинтетического светового потока
Спектр света	TCS34725	Определение цвета и спектра освещения
Влажность почвы	FC-28 / YL-69 / емкостной датчик	Аналоговые или цифровые
Турбидность воды	SEN0189	Измеряет мутность воды
Листовая температура	MLX90614	Инфракрасный датчик без контакта
NDVI / индекс растительности	Multispectral камеры (Parrot Sequoia, MAPI)	

В рамках полученной универсальной модели важными элементами являются алгоритм обработки данных с сенсоров и датчиков и алгоритм аннотирования полученных изображений в автоматическом режиме.

Алгоритм обработки данных с сенсоров и датчиков:

1. Инициализация: настройка GPIO и интерфейсов (I²C, 1-Wire, UART, RS-485), подключение к Wi-Fi и MQTT-брокеру, загрузка уставок и допустимых диапазонов из EEPROM, сброс счётчиков ошибок датчиков.

2. Основной цикл с периодом ТТ (1–10 с):

а) Опрос аналоговых датчиков (5 отсчётов с интервалом 10 мс) и цифровых (1-Wire, I²C, UART); фиксация ошибок чтения.

б) Медианная фильтрация и экспоненциальное скользящее среднее (EMA) с коэффициентами $\alpha=0,2$ (быстрые процессы) и $\alpha=0,05$ (медленные).

в) Преобразование в физические величины: температура (°C), влажность (%), pH, ЕС (мСм/см), CO₂ (ppm), PAR (мкмоль/м²/с), уровень жидкости (см), освещённость (лк).

г) Валидация по допустимым диапазонам; при выходе за пределы счётчик ошибок инкрементируется, при превышении порога датчик маркируется неисправным и используются последние достоверные значения или резервный датчик.

д) Сравнение с установками; при отклонении за гистерезис – дискретное включение/выключение реле или ПИД-регулирование (ШИМ); фиксация состояний исполнительных устройств.

е) Формирование JSON-пакета (метка времени, значения, статусы, состояния, режим) и отправка по MQTT/HTTP; при отсутствии связи – буферизация в SPIFFS с последующей передачей.

ж) Расчёт времени выполнения шагов; при остатке – переход в режим энергосбережения до начала следующего цикла.

3. Обработка прерываний: при срабатывании датчика протечки, превышении уровня или нажатии аварийной кнопки – немедленная остановка всех исполнительных устройств, отправка экстренного уведомления оператору, запись события в энергонезависимый лог.

Алгоритм аннотирования полученных изображений в автоматическом режиме.

Инициализация: загрузка предобученной модели Grounding DINO и формирование текстового промпта с перечнем классов в формате, ожидаемом моделью.

Загрузка метаданных: чтение файла с показаниями датчиков (температура, pH, ЕС и др.), содержащего временные метки для последующей интеграции с визуальными данными.

Формирование списка изображений: сканирование директории и выделение файлов, не прошедших аннотацию.

Цикл обработки изображений:

а) чтение изображения;

б) обнаружение объектов по текстовому описанию без предварительного обучения на размеченных примерах моделью Grounding DINO с заданным промптом;

в) фильтрация детекций по порогу уверенности;

г) преобразование координат выделенных областей в абсолютные (пиксели) или нормализованные;

д) сохранение результатов в формате JSON(имя файла, временная метка, список объектов с классами, координатами).

Объединение с метаданными: сопоставление аннотаций с данными датчиков по временным меткам (ближайшая запись).

6.Формирование набора данных:

а) экспорт в стандартные форматы (COCO, JSON, YOLO);

б) разделение на обучающую, валидационную и тестовую выборки (случайным образом или по временному признаку).

7. Логирование: фиксация количества обработанных изображений, распределения классов и ошибок для последующего анализа.

Обсуждение. Гидропонные системы обеспечивают стабильную высокую урожайность благодаря экономии воды и снижению трудозатрат. Аэропонные системы предлагают максимальный рост продуктивности за счет точного контроля параметров, но требуют сложного оборудования и высокого уровня квалификации оператора. Системы закрытого грунта с использованием встраиваемых систем позволяют достичь значительно-го увеличения урожайности, однако начальные затраты и проблемы с подключением в сельской местности могут стать препятствием для внедрения. В целом, автоматизация сельского хозяйства открывает новые горизонты для повышения эффективности и устойчивости производства продуктов питания.

Сравнительный анализ гидропонных, аэропонных и систем закрытого грунта подтверждает, что каждая из них обладает уникальными преимуществами и ограничениями, которые необходимо учитывать при выборе подходящей технологии для конкретных условий производства. Гидропонные системы предлагают высокую экономическую доступность, простоту масштабирования и значительную экономию воды (до 90%), что делает их идеальным решением для начинающих фермеров и мелкомасштабных хозяйств. Однако они требуют точного контроля над параметрами питательных растворов и уровнем pH, что увеличивает сложность эксплуатации [8]. Аэропоника, несмотря на высокие начальные затраты, обеспечивает максимальную урожайность (увеличение на 45–75%) и минимальное потребление воды (на 95%). Точное управление размером капель питательного раствора и параметрами окружающей среды делает эту технологию особенно привлекательной для городских хозяйств с ограниченными ресурсами. Однако высокие операционные расходы и техническая сложность обслуживания могут стать препятствием для широкого внедрения [8]. Системы закрытого грунта с использованием встраиваемых систем и автоматизации демонстрируют значительное повышение урожайности и устойчивости производства. Например, доходы от использования инновационных технологий могут превышать доходы традиционного сельского хозяйства в 4000 раз [5]. Однако такие системы требуют значительных начальных инвестиций и зависят от доступности электричества и квалифицированной рабочей силы, что может ограничивать их внедрение в развивающихся регионах.

Необходимо отметить, что датчики необходимо дополнительно оснастить дополнительными защитными корпусами с целью обеспечения бесперебойности работы вне зависимости от типа выращивания в агропроизводстве.

Данное исследование поможет в создании универсальной модели адаптивного управления замкнутыми агропроизводствами и разработке универсального интеллектуального фитотрона

Заключение. По результатам, сравнительного анализа предлагается концепция современной системы автоматизации различных способов выращивания растений за счёт унификации системы сбора данных о состоянии растения и окружающей среды, а также постоянного дообучения режимов выращивания различных культур в различных средах и ранней детекции заболеваний растений с целью увеличения эффективности выхода полезной продукции с квадратного метра агропроизводства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ali A., Hassan S., Khan M. Application of machine learning in predictive agriculture, *arXiv preprint arXiv:2312.00030*, 2023.
2. Despommier D., Carter M., Giacomelli G.A. The Vertical Farm: Feeding the World in the 21st Century, 2024. ISBN 9781429946049. Available at: <https://books.google.ru/books?id=0DxTK0jW35sC>.
3. Chowdhury M.A., Ahmed S., Islam M., et al. Development of an IoT-based indoor hydroponic system, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2023, Vol. 56, No. 102079. doi: 10.1016/j.seta.2023.102079.
4. Zhang Y., Li X., Wang Z. Smart farming techniques based on IoT and machine learning, *Smart Cities and Sustainability*, 2023. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827123001191> (accessed 7 April 2025).
5. Rajendiran G., Suresh P., Mohanraj R. Future of smart farming techniques: significance of urban vertical farming systems integrated with IoT and machine learning, *ResearchGate*, 2023. Available at: https://www.researchgate.net/profile/Gowtham-Rajendiran/publication/372890247_Future_of_Smart_Farming_Techniques_Significance_of_Urban_Vertical_Farming_Systems_Integrated_with_IoT_and_Machine_Learning/links/652a2e5f1a05311a23fbeb81/Future-of-Smart-Farming-Techniques-Significance-of-Urban-Vertical-Farming-Systems-Integrated-with-IoT-and-Machine-Learning.pdf (Accessed 7 April 2025).
6. Kumar S., Singh A., Gupta R. Sustainable agricultural systems with IoT and AI, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, Vol. 210, No. 107601. doi: 10.1016/j.compag.2023.107601.
7. Smith B., Johnson R., Williams T. Real-time soil monitoring using IoT, *Sensors*, 2023, Vol. 23, No. 1, pp. 451. doi: 10.3390/s23010451.
8. Omondi F., Odhiambo H., Okoye K. IoT-based water management in smart farming, *Journal of Digital Food, Energy and Water Systems*, 2023, Vol. 1, No. 1, pp. 2873. doi: 10.25603/uj.dfe.2023.2873.
9. Kim Y., Park S., Lee W. Wireless sensor networks for precision agriculture, *Sensors*, 2020, Vol. 20, No. 19, pp. 5637. doi: 10.3390/s20195637.
10. Chen H., Zhao Q., Wu Y. Comparative study of hydroponics and aeroponics under controlled conditions, *Environmental Research*, 2023, Vol. 224, No. 104895. doi: 10.1016/j.envres.2023.104895.

11. Petrov I., Smirnov A., Ivanov N. Energy-efficient IoT systems for controlled environment agriculture, *Environmental Technology & Innovation*, 2023, Vol. 25, No. 100230. doi: 10.1016/j.eti.2023.100230.
12. Al-Massri A., Al-Khatib M., Abu-Naser S. Smart irrigation systems using IoT and machine learning, *Water*, 2023, Vol. 15, No. 1, pp. 451. doi: 10.3390/w15010451.
13. Liu X., Zhang Y., Wang J. Intelligent algorithms for environmental monitoring in agriculture, *IEEE Access*, 2022, Vol. 10, pp. 7965-7975. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3197965.
14. Huang L., Zhao M., Sun Y. Machine learning applications in smart irrigation, *Agricultural Water Management*, 2023, Vol. 285, No. 108401. doi: 10.1016/j.agwat.2023.108401.
15. Rajendiran G., Prabakaran R., Balasubramanian K. Optimizing lettuce crop yield prediction in an indoor aeroponic vertical farming system using IoT-integrated machine learning regression models, *ResearchGate*, 2024. Available at: https://www.researchgate.net/profile/GowthamRajendiran/publication/381638477_Optimizing_Lettuce_Crop_Yield_Prediction_in_an_Indoor_Aeroponic_Vertical_Farming_System_Using_IoTIntegrated_Machine_Learning_Regression_Models/links/6677cd03d21e220d89c91f92/Optimizing-Lettuce-Crop-Yield-Prediction-in-an-Indoor-Aeroponic-Vertical-Farming-System-Using-IoT-Integrated-Machine-Learning-Regression-Models.pdf?__cf_chl_tk=5DSGdpFzRwfcKSP4HAmGplTjQ_InQN0dFJDPuGm2MII-1741624838-1.0.1.1-_KOfK7RxM3lwa6AlAt8r4pOrbUXgdBM_kU442SGz2I (Accessed 7 April 2025).
16. Kim J., Lee H., Park C. IoT-based monitoring and control for greenhouse environments, *Sensors*, 2022, Vol. 22, No. 15, pp. 5646. doi: 10.3390/s22155646.
17. Ivanova L., Petrova M. Prospects of IoT integration in vertical farming, *Technologies*, 2022, Vol. 10, No. 1, pp. 26. doi: 10.3390/technologies10010026.
18. Nguyen T., Tran V., Pham H. Cloud-based IoT platform for plant disease detection, *MDPI Sensors*, 2023, Vol. 23, No. 1. doi: 10.3390/s23010451.
19. Ruscio D., Marconi S., Di Benedetto M. Low-cost IoT hydroponic system for urban agriculture, *Food and Bioprocess Technology*, 2023, Vol. 138, pp. 119-130. doi: 10.1016/j.fbp.2023.01.010.
20. Tanaka K., Yamamoto S., Sato T. Urban vertical farming with smart climate control, *Springer Lecture Notes in Networks and Systems*, 2023, Vol. 615, pp. 115-125. doi: 10.1007/978-981-97-7603-0_15.
21. Patel R., Shah D., Desai N. Data-driven optimization of growing conditions in aeroponic systems, *Sustainability*, 2022, Vol. 14, No. 20, pp. 12345. doi: 10.3390/su142012345.

Кочкаров Азрет Ахматович – Федеральный исследовательский центр «Фундаментальные основы биотехнологии Российской академии наук»; e-mail: akochkar@fbras.ru; г. Москва, Россия; тел.: +74956603430 (доб. 499); зам. директора по инновационной работе Федерального государственного учреждения; д.т.н.; к.ф.-м.н.

Куликов Андрей Кириллович – МИРЭА – Российский технологический университет; e-mail: kulikov_a@mirea.ru; г. Москва, Россия; тел.: +74996008080; к.т.н.; доцент.

Мацакова Валерия Максимовна – Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации; email: 233390@edu.fa.ru; г. Москва, Россия; тел.: 89224401661; студентка.

Kochkarov Azret Akhmatovich – Federal Research Center for Fundamental Principles of Biotechnology of the Russian Academy of Sciences; e-mail: akochkar@fbras.ru; Moscow, Russia; phone: +74956603430, ext. 499; deputy director for Innovation at the Federal State Institution; dr. of eng. sc.; cand. of phys. and math. sc.

Kulikov Andrey Kirillovich – MIREA – Russian Technological University; e-mail: kulikov_a@mirea.ru; Moscow, Russia; phone: +74996008080; cand. of eng. sc.; associate professor.

Matsakova Valeria Maksimovna – Financial University under the Government of the Russian Federation; e-mail: 233390@edu.fa.ru; Moscow, Russia; phone: +79224401661; student.