

УДК 332.01

DOI 10.26118/2782-4586.2026.74.69.004

Шеломова Варьяна Александровна

Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова

Сибилева Елена Валерьевна

Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова

Применение методов ИИ для адаптивного управления микроклиматом в высокотехнологичном сельском хозяйстве

Аннотация. Статья посвящена исследованию перспектив применения технологий искусственного интеллекта (ИИ) для создания адаптивных систем управления микроклиматом в умных теплицах в условиях Республики Саха (Якутия). Актуальность работы обусловлена необходимостью перехода от традиционных систем с пороговыми правилами к интеллектуальному управлению, обеспечивающему устойчивое сельскохозяйственное производство в регионе с экстремальным климатом. В качестве решения предложена авторская архитектура адаптивной системы на основе гибридной модели (цифрового двойника) и алгоритма обучения с подкреплением. Приведены прогнозные данные о потенциальной эффективности подобных систем: увеличение урожайности, экономия энергоресурсов и значительное сокращение водопотребления. Обсуждаются ключевые преимущества, а также вызовы, связанные с внедрением, такие как стоимость, потребность в данных и интерпретируемость моделей и предложены пути их решения. Сделан вывод о том, что ИИ-технологии являются ключевым драйвером для создания автономных, ресурсоэффективных и устойчивых агропромышленных систем будущего.

Ключевые слова: сельское хозяйство, агроклимат, Республика Саха (Якутия), искусственный интеллект, микроклимат, биотехнология, умная теплица, интернет вещей (IoT), цифровой двойник

Shelomova Varyana Alexandrovna

North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov

Sibileva Elena Valeryevna

North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov

Application of AI Methods for Adaptive Microclimate Control in High-Tech Agriculture

Abstract. The article explores the prospects of applying artificial intelligence (AI) technologies to create adaptive microclimate control systems for smart greenhouses in the Republic of Sakha (Yakutia). The relevance of the work is driven by the need to transition from traditional threshold-based control systems to intelligent management, ensuring sustainable agricultural production in this region with its extreme climate. A proprietary architecture for an adaptive system based on a hybrid model (digital twin) and a reinforcement learning algorithm is proposed as a solution. Predictive data on the potential efficiency of such systems are presented, including increased crop yield, energy savings, and significant reductions in water consumption. Key advantages are discussed, alongside implementation challenges such as cost, data requirements, and model interpretability, with proposed pathways to address them. The conclusion is drawn that AI technologies are a key driver for creating autonomous, resource-efficient, and sustainable agricultural systems of the future.

Keywords: Agriculture, agroclimate, Republic of Sakha (Yakutia artificial intelligence (AI), microclimate, biotechnology, smart greenhouse, internet of Things (IoT), digital twin

Введение. Современный агропромышленный комплекс сталкивается с необходимостью устойчивого наращивания производства пищи при ограниченных ресурсах и в условиях изменения климата. Важным решением является развитие высокотехнологичных систем защищённого грунта, таких как теплицы и вертикальные фермы, обеспечивающих независимое круглогодичное выращивание. Однако их потенциал ограничен традиционными системами управления микроклиматом, основанными на статических правилах (PID-регуляторы, пороговые контроллеры).

Эти системы не учитывают комплексные взаимосвязи параметров среды, динамические потребности растений и изменения внешних условий, что ведёт к неоптимальным режимам, перерасходу ресурсов и снижению урожайности. В этом контексте искусственный интеллект (ИИ) становится ключевой технологией для перехода от автоматизации к созданию автономных самообучающихся агроклиматических систем.

Целью данного исследования является разработка концептуальной модели и методологии адаптивной системы управления микроклиматом теплицы на основе методов искусственного интеллекта, адаптированной к специфическим климатическим и экономическим условиям Республики Саха (Якутия).

Основная часть

Применение технологий искусственного интеллекта в сельском хозяйстве является ответом на глобальные вызовы продовольственной безопасности и устойчивого развития. На основе анализов научной литературы, отраслевых отчетов и кейсов выявлены ключевые технологические направления:

1. Прецизионное земледелие и прогнозная аналитика
2. Мониторинг здоровья растений и борьба с вредителями
3. Агроробототехника и автономные системы
4. Прогнозирование и управление урожаем
5. Оптимизация водных и энергетических ресурсов
6. Управление скотоводством [2].

Особое внимание уделено специфике внедрения в условиях Российской Федерации, где сочетаются потребности в технологическом суверенитете, климатическое разнообразие и неравномерность цифровизации [2]. Для Республики Саха (Якутия) ключевыми региональными особенностями, формирующими уникальные требования к системе, являются [9]:

1. Экстремально низкие температуры ($-50\text{ }^{\circ}\text{C}$), сезонные перепады, короткий световой день зимой и длинный – летом.
2. Высокая стоимость привозного топлива и тепловой энергии, что делает энергосбережение важным фактором
3. Удаленность и логистическая сложность, которая повышает ценность локального производства
4. Приоритет выращивания быстрорастущих, холодостойких культур, также адаптация технологий требовательных культур (огурцы, томаты) в экстремальных условиях.

Ключевыми преимуществами, как отмечают авторы, выступают: обеспечение круглогодичного выращивания в неблагоприятных климатических условиях, снижение трудозатрат и человеческого фактора, повышение урожайности за счет поддержания оптимальных диапазонов параметров (t° : $16\text{-}25^{\circ}\text{C}$, влажность почвы: $65\text{-}80\%$, освещенность: $40\text{-}60\text{ Вт/м}^2$). Энерго- и ресурсосбережение за счет дозированного управления [1]. Однако существующие обзоры [5,6] часто носят генерализированный характер и слабо учитывают экстремальность условий, где традиционные эмпирические данные для обучения моделей могут отсутствовать или быть недостаточными.

Традиционная «умная теплица», пример которой детально описан в работе Левашкина А.Г. и Малуши А.В. [3], представляет собой важный, но промежуточный этап.

Её архитектура, основанная на пороговых правилах, решает задачи базовой автоматизации, но лишена адаптивности и прогностической способности [3].

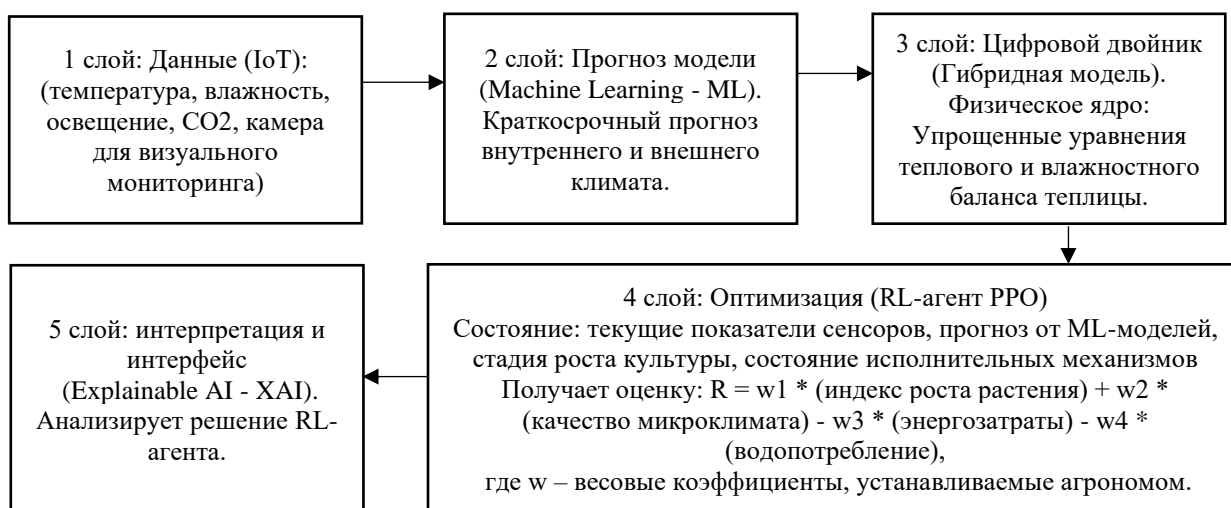
Нейронные сети являются мощным инструментом для задач прогнозирования микроклимата в теплицах благодаря способности аппроксимировать сложные нелинейные зависимости без явного программирования [5]. Выделяют следующие два принципиально разных подхода к моделированию климата:

1. Физические (белые ящики): На основе уравнений баланса массы и энергии. Точны, но требуют множества параметров, сложны в расчетах.
2. Методы «черного ящика»: Эмпирические, на основе данных (включая ИНС). Гибки для нелинейных задач, но требуют больших данных и могут сходиться к локальным оптимумам [5].

Для преодоления недостатков этих двух подходов перспективным является гибридный метод, сочетающий законы (например, базовый энергетический баланс) с возможностью машинного обучения для калибровки и учета непрогнозируемых факторов. Такой подход является основой, предлагаемой нами концепции цифрового двойника.

Рассмотренные два подхода к моделированию микроклимата создают основу для следующего критического этапа – непосредственной оптимизации управления. В предлагаемой архитектуре (Рис.1) гибридная модель (цифровой двойник) теплицы служит средой для алгоритма обучения с подкреплением.

Рисунок 1 – Архитектура интеллектуальной системы «Умной теплицей» на основе ИИ



План проверки модели:

1) Разработка симуляционной среды, которая будет предусматривать создание виртуального двойника на Python с использованием библиотек PyTorch, Gymnasium. Модель будет использовать реальные климатические параметры Якутии.

2) Базовый эксперимент: Сравнение эффективности RL-агента и классического порогового регулятора в одинаковых условиях симуляции на протяжении полного цикла выращивания растения.

3) Ключевые метрики:

- Для микроклимата: Качество поддержания температуры и влажности (по отклонениям от нормы и времени нахождения вне целевого диапазона).
- Для ресурсов: Суммарные затраты на энергию для обогрева, освещения и воду для полива.
- Для урожая: Количество полученной биомассы (на основе упрощенной модели роста, учитывающей совокупность условий).

4) Проверка адаптации: Анализ работы систем в смоделированных нестандартных ситуациях (внезапное похолодание, снижение освещенности)

Ожидается, что RL-агент продемонстрирует более плавное управление, предупредительные действия (например, предварительный подогрев перед прогнозируемым похолоданием) и лучший компромисс между качеством среды и затратами.

По данным аналитиков и пилотных проектов [5,6], внедрение комплексных ИИ-систем, особенно с RL-контроллерами, позволяет достичь:

1. Увеличение урожайности на 10-25% за счёт точного поддержания оптимальных условий на всех стадиях роста.

2. Экономия энергоресурсов на 15–30% благодаря предиктивному и адаптивному управлению, что подтверждается как модельными расчётами [7], так и полевыми испытаниями [6].

3. Сокращение водопотребления на 20–40% за счёт перехода от периодического полива к прецизионному управлению, основанному на актуальной потребности растений и прогнозе испарения [8].

Вместе с тем, необходимо обозначить критические вызовы, характерные для Якутии, и наметить пути их решения:

1. Высокая начальная стоимость и сложность разработки/настройки RL-моделей. Для решения данной проблемы необходимо сделать фокус на разработке модульных решений с открытым исходным кодом и поэтапном внедрении, начиная с пилотной теплицы.

2. Потребность в больших объёмах разнородных данных (климатических, агрономических, визуальных) для обучения, что может быть затруднительно на новых объектах. Необходимо использовать предобученные симуляционные модели (цифровых двойников) и методов Transfer Learning для быстрой донастройки на реальных объектах.

3. Проблема интерпретируемости (объяснимости) решений сложных нейросетевых моделей. Необходима обязательная интеграция инструментов ХАИ (SHAP, LIME) в интерфейс управления для агронома.

4. Проблема адаптации к экстремальным условиям. Необходимо явное включение региональных климатических параметров и ограничений по энергопотреблению в цифровой двойник и функцию вознаграждения RL-агента.

Заключение

Проведённый анализ демонстрирует, что переход от автоматизированных к интеллектуальным адаптивным системам на основе ИИ является закономерным и необходимым этапом развития высокотехнологичного сельского хозяйства. В рамках данного исследования была сформулирована цель, предложена конкретная авторская методология, включающая архитектуру системы с гибридным цифровым двойником и RL-агентом.

Комбинация IoT-сенсоров, прогнозных ML-моделей, систем мониторинга на базе глубокого обучения и, что наиболее важно, алгоритмов обучения с подкреплением для оптимизации управления, открывает путь к созданию по-настоящему автономных тепличных комплексов. Представленный план симуляционного эксперимента служит основой для дальнейшего научного исследования и получения доказательной базы эффективности предложенного подхода.

Для Республики Саха (Якутия) развитие подобных «умных» агротехнологий имеет стратегическое значение, так как позволяет обеспечить региональную продовольственную безопасность, создать высокотехнологичные рабочие места и эффективно использовать уникальные климатические условия (например, избыток солнечной радиации летом) в рамках политики импортозамещения и устойчивого развития Арктической зоны РФ.

Список источников

1. Михайлова Н.А., Антипов А.В. Автоматизация умной теплицы: разработка и внедрении системы управления микроклиматом // Вестник науки №3 (84) том 1. С. 557 - 561. 2025 г. ISSN 2712-8849 // Электронный ресурс: <https://www.вестник-науки.рф/article/21730> (дата обращения: 11.12.2025 г.)
2. Искусственный интеллект в сельском хозяйстве // Погода в поле. – URL: <https://погодавполе.рф/iskusstvenniy-intellekt-v-selskom-khozyaystve> (дата обращения: 12.12.2025).
3. Левашкин А. Г. Разработка универсальной системы умной теплицы / А. Г. Левашкин, А. В. Малуша // Инноватика-2023 : сборник материалов XIX Международной школы-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 21-22 апреля 2023 г., г. Томск, Россия. Томск, 2023. С. 50-54. URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/koha:001006161>
4. Черепенин В.А., Кацупеев А.А. Анализ подходов к созданию системы «Умная теплица» на основе нейронной сети // Программные системы и вычислительные методы. 2024. № 1. DOI: 10.7256/2454-0714.2024.1.69794 EDN: XAZVOW URL: https://nbpublish.com/Hbrary_read_article.php?id=69794
5. van Os J., et al. Digital Twins in Horticulture: A Review // Computers and Electronics in Agriculture. 2022. Vol. 199. P. 107183.
6. The Future of Indoor Farming: Technology, Economics and Sustainability // BCG Report. 2021. URL: <https://www.bcg.com/publications/2021/future-of-indoor-farming> (дата обращения: 12.10.2025).
7. Hemming S., et al. Reinforcement Learning for Climate and Irrigation Control in Greenhouses: A Simulation Study // IFAC-PapersOnLine. 2020. Vol. 53(2). Pp. 16798-16803.
8. Jones H.G. Irrigation Scheduling: Advantages and Pitfalls of Plant-Based Methods // Journal of Experimental Botany. 2004. Vol. 55(407). Pp. 2427-2436.
9. Методика формирования баланса продовольственных ресурсов Республики Саха (Якутия) с учетом региональных особенностей: методическое пособие / Г.И. Даянова, И.К. Егорова, Л.Д. Протопопова, Н.Н. Никитина, А.Н. Крылова, А.Ф. Баишева – Якутск: Изд. дом «Дьолуо», 2019. – 335 с.

Сведения об авторах

Шеломова Варьяна Александровна – магистрант кафедры менеджмента Финансово-экономического института, ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова», г. Якутск, Россия

Сибилева Елена Валерьевна – к.э.н., доцент Финансово-экономического института, ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова», г. Якутск, Россия

Information about the authors

Shelomova Varyana Alexandrovna – Master’s student of the Department of Management of the Institute of Economics and Finances, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

Sibileva Elena Valeryevna – Cand. Sci. (Economics), Associate Professor, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia