

АННОТАЦИЯ

диссертационной работы Тогисбаевой Айнуры Мухтаровны на тему «Разработка IT технологии для интеллектуального экологического мониторинга агроэкосистемы плодовых культур в условиях Юго-Восточного Казахстана» представленной на соискание степени доктора философии (PhD) по образовательной программе 8D05204 – «Экология»

Актуальность темы исследований. Предгорная зона Заилийского Алатау сочетает высокий продуктивный потенциал плодовых культур с нарастающей климатической уязвимостью. За период исследований (2021–2024 гг.) среднегодовая температура воздуха превышала климатическую норму на 2,6–3,7 °С, дефицит осадков за вегетационный период достигал 15–30 %, а частота поздневесенних заморозков возросла, обуславливая потери урожая от 15 до 70 % в зависимости от года. В этих условиях переход к цифровому экологическому мониторингу агроэкосистем становится необходимым инструментом устойчивого управления садоводством.

Степень научной разработанности темы исследований. Существующие решения интеллектуального сельского хозяйства ориентированы преимущественно на крупные зернопроизводящие хозяйства умеренного пояса и не учитывают физиологических особенностей многолетних плодовых насаждений в аридных условиях Центральной Азии. Комплексная система, объединяющая наземные IoT-датчики, спутниковые вегетационные индексы и алгоритмы машинного обучения применительно к яблоневому саду Юго-Восточного Казахстана, ранее не создавалась, что определяет актуальность исследования. Тема соответствует приоритетам Стратегии «Казахстан-2050», национального проекта «Жасыл Қазақстан» и Целей устойчивого развития ООН (ЦУР 2, 6, 12, 15). Исследования выполнены в рамках бюджетной программы 217 «Развитие науки» (подраздел 101 «Программно-целевое финансирование») Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, договор № 154 по теме BR05236444. Полевые наблюдения вошли в многолетний цикл базовых данных по экологическому мониторингу агроэкосистем плодовых культур Юго-Восточного Казахстана и согласуются с приоритетами устойчивого развития агропромышленного комплекса страны.

Цель и задачи исследования. Цель исследования — разработать и научно обосновать IT-технологии интеллектуального экологического мониторинга агроэкосистемы яблоневых садов на основе интеграции IoT-сенсоров, спутникового зондирования и методов машинного обучения для оптимизации управления насаждениями и повышения экологической устойчивости плодового садоводства в условиях Юго-Восточного Казахстана.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- провести комплексный анализ почвенно-климатических условий и экологического состояния агроэкосистемы яблоневых садов юго-востока Казахстана в контексте глобального изменения климата;
- разработать систему мониторинга агроэкосистемы на основе IoT-технологий с созданием единой базы данных абиотических параметров среды;
- исследовать посредством системы мониторинга влияние водоресурсосберегающих приёмов инновационной технологии на почвенно-биологические ресурсы и продуктивность агроэкосистемы сада;
- оценить на основе данных IT-мониторинга воздействие абиотических и антропогенных факторов окружающей среды на функционирование агроэкосистемы производственного и интенсивного сада;
- обосновать экологическую целесообразность и экономическую эффективность применения IT-технологии мониторинга для оптимизации выращивания яблони в условиях юго-востока Казахстана.

Объект и предмет исследования. Объект исследования — агроэкосистема интенсивного яблоневого сада площадью 10 га в предгорной зоне Заилийского Алатау (село Турген, Алматинская область; 43°24' с.ш., 77°35' в.д.; высота 980–1020 м над уровнем моря). Сортовой состав насаждений: Голден Делишес — 40 %, Американка — 30 %, Апорт — 20 %, Ренет Симиренко — 10 %; густота посадки 500 деревьев/га; почвы — тёмно-каштановые. Предмет исследования — закономерности функционирования агроэкосистемы, выявляемые методами интеллектуального IT-мониторинга, и количественные взаимосвязи между абиотическими факторами среды, управляющими воздействиями и продуктивностью плодовых насаждений.

Теоретико-методологическая основа исследования. В работе применены методы IoT-мониторинга (микроконтроллеры ESP32-WROOM-32; датчики SHT31, BME280, DS18B20), методы машинного обучения (Random Forest, Gradient Boosting, Logistic Regression, многослойный перцептрон MLP), дистанционного зондирования Земли (Sentinel-2, платформа EOSDA Crop Monitoring; вегетационные индексы NDVI, NDWI, MSAVI, NDRE), классические методы полевого опыта по Б.А. Доспехову, почвенные методы (ГОСТ 26213-91, ГОСТ 28268-89), расчёт суммарного водопотребления по методике FAO-56, дисперсионный анализ с оценкой наименьшей существенной разности (НСР₀₅).

Информационная база исследования. Информационную базу исследования составили данные непрерывного IoT-мониторинга комплекса «MOM SENSOR» (свыше 2,1 млн измерений за 2021–2024 гг.), материалы дистанционного зондирования Sentinel-2 (через платформу EOSDA), данные РГП «Казгидромет», а также результаты полевых наблюдений и лабораторных анализов на экспериментальном яблоневом саду площадью 10 га (село Турген, Алматинская область).

Научная новизна. Научная новизна диссертационной работы заключается в разработанной шестиуровневой IoT-архитектуры экологического

мониторинга, адаптированной к специфике многолетних плодовых культур в аридных условиях Центральной Азии. Впервые создан и верифицирован комплекс из пяти моделей машинного обучения для прогнозирования агроклиматических рисков плодового сада, интегрированный с данными IoT-датчиков и спутниковых вегетационных индексов. Установлены количественные закономерности динамики водного режима тёмно-каштановых почв методом непрерывного IoT-мониторинга и доказана тесная корреляция интегрального индекса $iNDVI$ с урожайностью ($r = 0,91$). Выполнена комплексная эколого-экономическая оценка системы интеллектуального мониторинга для пловодства Юго-Восточного Казахстана с подтверждением её результативности в полевых условиях.

Личный вклад автора. Все этапы исследования выполнены автором самостоятельно. Автором разработана архитектура и программное обеспечение аппаратно-программного комплекса «MOM SENSOR», спроектирована геопространственная база данных PostgreSQL с расширениями TimescaleDB и PostGIS, реализован комплекс из пяти моделей машинного обучения для прогнозирования агроклиматических рисков, выполнена интеграция со спутниковой платформой дистанционного зондирования Sentinel-2 (EOSDA Crop Monitoring) и создан образовательный веб-портал.

Автором лично собрана и развёрнута аппаратная часть комплекса — четыре автономные сенсорные станции на базе микроконтроллеров ESP32-WROOM-32 с датчиками SHT31, BME280, DS18B20 и автономным энергообеспечением; заложены и проведены четырёхлетние полевые эксперименты (2021–2024 гг.) на производственном яблоневоом саду площадью 10 га в предгорной зоне Заилийского Алатау.

Автором выполнены сбор и статистическая обработка экспериментальных данных (свыше 2,1 млн измерений), интерпретация результатов и комплексная эколого-экономическая оценка эффективности разработанной IT-технологии, а также подготовка научных публикаций по теме диссертации и апробация результатов на международных конференциях.

Основные научные положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся следующее:

- шестиуровневая IoT-архитектура аппаратно-программного комплекса «MOM SENSOR» обеспечивает непрерывный экологический мониторинг агроэкосистемы яблоневого сада со средней полнотой валидированных данных 96,5 % и доступностью сервиса 97,2 %
- комплекс из пяти моделей машинного обучения позволяет прогнозировать агроклиматические риски сада с практически значимой точностью (прогноз заморозков: $F1 = 0,64$, $AUC-ROC = 0,82$);
- интегральный вегетационный индекс $iNDVI$ тесно коррелирует с урожайностью ($r = 0,91$; $p < 0,01$), а индекс $NDWI$ — с данными почвенной влажности ($r = 0,81$), что обосновывает дистанционную оценку состояния агроэкосистемы;
- применение водосберегающих технологий (капельное орошение в сочетании с гидрогелем AQUASORB) повышает эффективность

использования воды и урожайность при снижении ирригационного водозабора;

- внедрение IT-технологии улучшает показатели почвенного плодородия (содержание гумуса повышается с 3,78 до 4,02 %) и снижает пестицидную нагрузку на агроэкосистему;
- комплексная эколого-экономическая оценка подтверждает высокую эффективность разработанной IT-технологии в условиях Юго-Восточного Казахстана.

Теоретическая и практическая значимость. Результаты вносят вклад в развитие методологии экологического мониторинга агроэкосистем: обоснованы принципы построения многоуровневых IoT-систем для многолетних плодовых культур, установлены количественные связи дистанционных индексов с продуктивностью и водным режимом, что создаёт научную основу цифрового управления садоводством в аридных регионах. IT-технология «MOM SENSOR» внедрена в практику управления яблоневым садом площадью 10 га в предгорной зоне Заилийского Алатау. Результаты могут использоваться садоводческими предприятиями для повышения эффективности и экологической устойчивости плодородства, а также в учебном процессе аграрных вузов. Экономическая эффективность технологии: рентабельность 1396 %, срок окупаемости менее одного месяца, совокупный годовой экономический эффект 16 128 тыс. тенге на 10 га. В совокупности внедрение IT-технологии обеспечило прибавку урожая на 26 % (212 против 168 ц/га), экономию оросительной воды на 26 % (4,6 против 6,2 тыс. м³/га), сокращение числа пестицидных обработок на 25 %, снижение потерь от поздневесенних заморозков, рост содержания гумуса с 3,78 до 4,02 % и повышение биологической активности почвы на 34–50 %. Достоверность результатов обеспечена применением современных стандартизированных методов исследований, репрезентативным объёмом данных (свыше 2,1 млн измерений), метрологической верификацией сенсорной сети по данным «Казгидромет» и статистической обработкой результатов при 5 %-ном уровне значимости (HCp_{05}) с использованием дисперсионного анализа.

Апробация и внедрение результатов исследования. Основные результаты диссертационного исследования доложены и обсуждены на международных научно-практических конференциях: XV Международной научной конференции «Trends in the development of science and practice» (Мадрид, Испания, 2021); XXXIV Международной конференции European Academic Science and Research (Гамбург, Германия, 2022); научной конференции Русенского университета имени Ангела Кънчева (Русе, Болгария, 2022); Международной научно-практической конференции молодых учёных и студентов, посвящённой 90-летию академика К.С. Сабденова (КазНАИУ, Алматы, 2023); IV Международном научно-практическом симпозиуме-конкурсе молодых учёных СНГ (2023), где работа отмечена дипломом I степени; Международном научно-практическом симпозиуме «Знание и инновации в сельском хозяйстве» (Ташкент, Узбекистан, 2024).

Результаты исследования внедрены в производственную деятельность ТОО «Freelancity» (акт внедрения от 01.03.2025; Приложение М): в коммерческое использование введены программно-аппаратный комплекс MOM SENSOR, пять моделей машинного обучения и веб-портал мониторинга. На базе результатов диссертационного исследования 21 апреля 2026 г. в Международном финансовом центре «Астана» (AIFC) зарегистрирована частная компания AISAAT Limited (регистрационный номер AFSA-O-CA-2026-6009; Приложение П) для коммерциализации разработанной IT-технологии. Разработанные практические рекомендации производству приведены в Приложении Н. IT-технология «MOM SENSOR» применяется в управлении производственным яблоневым садом площадью 10 га в селе Турген Алматинской области.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 научных работ, в том числе 2 статьи в журналах, индексируемых в базе данных Scopus (Biodiversity and Conservation, Q1; Journal of Water and Land Development), 2 статьи в изданиях, рекомендованных КОКНВО МНиВО РК (журнал «Ізденістер, нәтижелер» КазНАИУ), и 7 публикаций в материалах международных научно-практических конференций.

Список основных публикаций:

1 Effect of outdoor recreation on forest phytocenosis // Biodiversity and Conservation. – 2022. – Vol. 31. – P. 1893–1908 (Scopus, Q1). <https://doi.org/10.1007/s10531-022-02425-6>

2 Ecological assessment of soil contamination with heavy metals under application of mineral fertilisers // Journal of Water and Land Development. – 2023. – No. 56. – P. 74–80 (Scopus). <https://doi.org/10.24425/jwld.2023.143747>

3 Садоводство в условиях изменения климата Юго-Восточного Казахстана с применением приёмов инновационной технологии (при выращивании яблони) // Ізденістер, нәтижелер – Исследования, результаты. КазНАИУ. – 2023. – №02(98). – С. 199–209.

4 Влияние абиотических факторов экосистемы на рост и развитие плодовой культуры (яблони) при изменении климата // Ізденістер, нәтижелер – Исследования, результаты. КазНАИУ. – 2024. – №02(102). – С. 63–73.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Общий объём составляет 150 страниц без приложений, включая 54 рисунка, 63 таблицы и 270 страниц с приложениями, включая 124 рисунка, 131 таблицу и 12 приложений (А–Н). Библиография содержит 133 источника, из них 98 на английском языке.