

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Институт радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ  
Школа бакалавриата

## ОТЧЕТ

По проекту  
«Разработка цифрового двойника агрофермерского комплекса»  
по дисциплине «Проектный практикум»

Заказчик: Фамилия И.О.  
Куратор: Фамилия И.О.  
ученая степень, ученое звание, должность

Студенты команды  
Фамилия И.О.  
Фамилия И.О.  
Фамилия И.О.  
Фамилия И.О.

Шестеров М.А.
Дербенева В.В.
доцент, менеджер по про- ектам
KegaBoom
Горшков Г.С.
Зорин И.С.
Волчихин А.А.
Кармолина Е.Е.

Екатеринбург, 2025

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1 Анализ требований заказчика и формирование плана реализации .....	5
2 Анализ и сопоставление аналогов разрабатываемого продукта .....	9
3 Архитектурная концепция цифрового двойника и обоснование проектных решений.....	12
4 Методология разработки, ход проекта и итоги промежуточного тестирования.....	14
5 Планирование разработки и организация работы команды .....	16
6 Индивидуальный вклад участников команды.....	18
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	20
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	23

## ВВЕДЕНИЕ

Современное сельское хозяйство переживает этап активной цифровой трансформации. Внедрение информационных технологий в аграрный сектор открывает широкие перспективы для повышения эффективности производства, оптимизации процессов и устойчивого развития фермерских хозяйств. Однако на практике уровень цифровизации в агрофермерской сфере всё ещё остаётся недостаточным, что приводит к неэффективному управлению ресурсами, снижению продуктивности, увеличению издержек и потере конкурентных преимуществ. В условиях роста глобального спроса на продовольствие, климатических вызовов и необходимости бережного отношения к природным ресурсам, аграрному сектору требуются современные инструменты управления. Одним из таких инструментов являются цифровые двойники — виртуальные модели, точно отражающие структуру, процессы и поведение реальных объектов [1]. Их использование позволяет прогнозировать развитие событий, тестировать управленческие решения и повышать точность планирования без риска для реального производства.

В рамках данного проекта была поставлена цель разработать цифровой двойник агрофермерского комплекса, способный воспроизводить основные процессы, происходящие на аграрном предприятии, и предоставлять инструменты для их анализа и оптимизации. Проект имеет также образовательную направленность, предполагая получение практических навыков в области системного анализа, цифрового моделирования, проектирования, прототипирования и взаимодействия с заказчиком. Ключевыми ориентирами в процессе работы выступали проведение глубокой аналитики текущего состояния отрасли, формулирование гипотез по возможным улучшениям, создание концепции цифровой модели, а также реализация программного прототипа с возможностью его последующей адаптации под конкретные нужды пользователя.

Актуальность разработки обусловлена объективной потребностью аграрного сектора в новых цифровых решениях, способных повысить эффективность и устойчивость хозяйственной деятельности. Программный продукт, созданный в рамках проекта, ориентирован на применение в аграрных предприятиях различного масштаба — от малых ферм до крупных агрохолдингов. Он может быть полезен управленцам, агроаналитикам, инженерам и ИТ-специалистам как инструмент визуализации, планирования и принятия решений. Потенциальная область применения включает автоматизацию процессов, мониторинг состояния ресурсов, оптимизацию логистики, прогнозирование урожайности и моделирование стратегий развития [5]. На более широком уровне решение может использоваться в образовательных и исследовательских целях, демонстрируя принципы цифровизации аграрных систем.

Ожидается, что по завершении проекта будет создан функциональный прототип цифрового двойника, способный имитировать ключевые процессы агрофермерского комплекса и служить основой для дальнейшего развития. Также в рамках проекта предполагается подготовка полного пакета аналитических и технических материалов, включая архитектуру решения, описание сценариев использования и рекомендации по интеграции. Итогом работы станет представление проекта заказчику, получение обратной связи и оценка соответствия полученного решения его ожиданиям и требованиям. Выполнение всех условий, обозначенных заказчиком, и его удовлетворённость результатом рассматриваются как основное достижение и показатель успешности проделанной работы

## **1 Анализ требований заказчика и формирование плана реализации**

Одним из ключевых этапов проекта по разработке цифрового двойника агрофермерского комплекса стал разбор требований заказчика и потенциальных пользователей программного продукта. Этот этап определил как вектор всей последующей работы, так и её методологическую основу. Заказчик поставил задачу не просто разработать технический прототип, но прежде всего погрузиться в предметную область, понять специфику агрофермерского производства, изучить актуальные вызовы и тенденции, а затем на основании аналитических данных выдвинуть обоснованные гипотезы по улучшению процессов с последующим внедрением этих идей в цифровую модель.

Для выполнения этой задачи команда проекта начала с подробного анализа требований, озвученных заказчиком. Первоначально особое внимание было уделено уточнению и формализации этих требований, чтобы на всех этапах работы сохранялось понимание конечной цели. Главными направлениями стали: погружение в агропромышленную тематику, выявление текущих проблем в управлении агрофермами, анализ мирового опыта, исследование уже реализованных цифровых решений и, наконец, проектирование собственной структуры цифрового двойника. Важно отметить, что акцент был сделан именно на глубокой аналитике, которая должна была лечь в основу всей проектной логики. Анализ выполнялся по нескольким направлениям: научно-исследовательские статьи, описывающие современные подходы в цифровизации сельского хозяйства; бизнес-кейсы внедрения цифровых решений на международных рынках; а также дополнительные источники, включая материалы, сгенерированные искусственным интеллектом — например, систематизации по принципу генерации гипотез и анализа рисков.

Собранная информация была структурирована, после чего команда перешла к формированию так называемого дерева гипотез развития (рисунок 1).

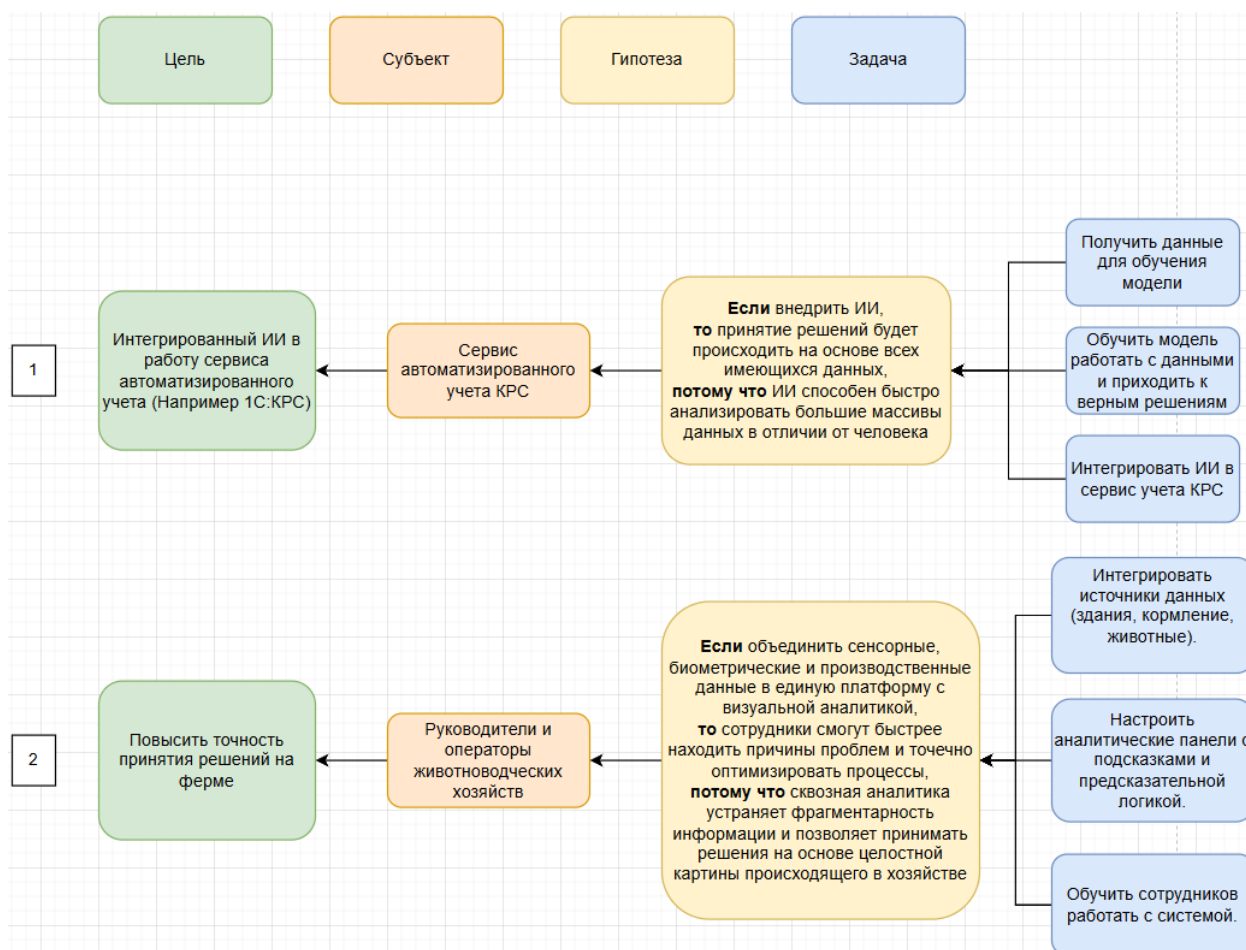


Рисунок 1 – Часть дерева гипотез

Этот инструмент позволил представить возможные направления оптимизации в виде логически связанных ветвей, где каждая гипотеза опиралась на конкретные данные и тенденции, выявленные в ходе аналитики. Например, в рамках одного из направлений была сформулирована гипотеза о необходимости внедрения автоматизированной системы мониторинга состояния почв и посевов с использованием датчиков и ИИ-аналитики. В другой ветке — идея предиктивного моделирования урожайности на основе погодных условий и исторических данных. Эти и другие гипотезы не только

легли в основу функциональных требований к цифровому двойнику, но и задали вектор дальнейших проектных решений.

Для того чтобы организовать работу последовательно и управляемо, задачи были декомпозированы и структурированы в виде backlog'а (рисунок 2). Он включал в себя как исследовательские, так и технические задачи, от первичного анализа до прототипирования и валидации решений. Все элементы backlog'а были приоритизированы в соответствии с важностью для заказчика, наличием источников данных и возможностью реализации в рамках проектного периода.

Задача	Сложность	Ответственный	Сроки	Статус	Готовность спринта
1 КТ. Аналитика					Реализован
Наладить связь с заказчиком	★	Горшков Г.	25.03.2025	Выполнено	
Создание групповых чатов	★	Горшков Г.	25.03.2025	Выполнено	
Определение темы проекта	★	Вся команда	28.03.2025	Выполнено	
Проведение ознакомительной встречи с командой	★	Вся команда	28.03.2025	Выполнено	
Формирование общего видения продукта	★	Вся команда	28.03.2025	Выполнено	
Проведение аналитики целевой аудитории	★	Горшков Г.	01.04.2025	Выполнено	
Создание общего хранилища	★	Горшков Г.	01.04.2025	Выполнено	
Создание общего транскрипта исходных кодов	★	Зорин И., Волчихин А.	01.04.2025	Выполнено	
Выбор стека	★	Вся команда	01.04.2025	Выполнено	
Поиск референсов	★★	Вся команда	03.04.2025	Выполнено	
Обзор подобных задач	★★	Вся команда	03.04.2025	Выполнено	
Декомпозиция задач	★★★	Горшков Г.	03.04.2025	Выполнено	
Изучение фреймворка Domain-Driven Design	★★★★	Вся команда	07.04.2025	Выполнено	
Глубокая аналитика 3-х источников на каждого участника команды	★★★★★	Вся команда	05.04.2025	Выполнено	
Формирование 3-х гипотез на каждого участника команды	★★★★★	Вся команда	05.04.2025	Выполнено	
Подготовка презентации для 1 КТ	★★★★★	Горшков Г.	07.04.2025	Выполнено	
Подготовка видеопрезентации для 1 КТ	★★★★★	Горшков Г.	07.04.2025	Выполнено	
2 КТ. Проектирование					Реализован
Скооперироваться со второй командой проекта	★	Горшков Г.	08.04.2025	Выполнено	
Выбрать среду для работы с базой знаний	★★	Вся команда	09.04.2025	Выполнено	
Составление единой базы знаний	★★★★	Вся команда	10.04.2025	Выполнено	
Глубокая аналитика 3-х источников на каждого участника команды	★★★★★	Вся команда	11.04.2025	Выполнено	
Формирование 3-х гипотез на каждого участника команды	★★★★★	Вся команда	11.04.2025	Выполнено	
Систематизация и структурирование информации	★★★★★	Вся команда	13.04.2025	Выполнено	
Глубокая аналитика 4-х источников на каждого участника команды	★★★★★	Вся команда	18.04.2025	Выполнено	
Формирование 4-х гипотез на каждого участника команды	★★★★★	Вся команда	18.04.2025	Выполнено	
Систематизация и структурирование информации	★★★★★	Вся команда	20.04.2025	Выполнено	
Создать дерево гипотез	★★★★★	Вся команда	21.04.2025	Выполнено	
Выстроить онтологию в предметной области	★★★★★	Вся команда	21.04.2025	Выполнено	
Сформировать базу знаний источников/промптов	★★★★★	Вся команда	21.04.2025	Выполнено	
Предоставление материалов заказчику	★★	Вся команда	22.04.2025	Выполнено	
Промежуточное утверждение гипотез	★	Вся команда	22.04.2025	Выполнено	
Проведение встречи с CEO	★★	Вся команда	28.04.2025	Выполнено	
Формирование дальнейших задач от заказчика	★★	Вся команда	28.04.2025	Выполнено	
Подготовка презентации для 2 КТ	★★★★	Горшков Г.	01.05.2025	Выполнено	
Подготовка видеопрезентации для 2 КТ	★★★★	Горшков Г.	01.05.2025	Выполнено	
3 КТ. Прототипирование					Реализован
Проанализировать существующие модели прогнозирования производства молока (удой)	★★★★	Вся команда	12.05.2024	Выполнено	
Выявить симулятор прогнозирования на основе разработанной модели	★★★★	Вся команда	12.05.2024	Выполнено	
Провести учет физиологии животного, почвы и природно-климатические условия	★★★★	Вся команда	12.05.2024	Выполнено	
Создание цифрового двойника	★★★★★	Вся команда	19.05.2024	Выполнено	
Подготовка презентации для 3 КТ	★★★★★	Горшков Г.	30.05.2024	Выполнено	
Подготовка видеопрезентации для 3 КТ	★★★★★	Горшков Г.	30.05.2024	Выполнено	
Написание итоговых отчетов	★★★★	Горшков Г.	30.05.2025	Выполнено	
Подготовка к защите	★★	Горшков Г.	31.05.2025	Выполнено	
Сдача проекта	★★★★★	Вся команда	01.06.2025	Выполнено	

Рисунок 2 – Backlog

На практике это позволило выстроить гибкую, но чётко структурированную схему работы, в которой каждая задача была не

изолированным элементом, а частью единой системы по созданию цифрового двойника. Таким образом, разбор требований заказчика и пользователей стал не просто вводной частью проекта, а полноценным фундаментом, на котором была построена вся архитектура будущего решения

## 2 Анализ и сопоставление аналогов разрабатываемого продукта

Важным этапом при проектировании цифрового двойника агрофермерского комплекса стал анализ существующих решений в области прогнозирования производства молока и управления молочными стадами [16]. Понимание уже реализованных подходов позволило не только избежать дублирования, но и критически осмыслить сильные и слабые стороны каждого из них, чтобы построить собственную, адаптированную под региональные условия, архитектуру модели. Наиболее распространёнными подходами к прогнозированию удоя являются статистические модели (ARIMA, SARIMA), машинное обучение (нейросети, ансамбли), механистические симуляторы (например, LIVSIM), а также их гибридные сочетания [6]. Согласно обзору, SARIMA-модели продемонстрировали высокую точность долгосрочных прогнозов, особенно в условиях выраженной сезонности, характерной для молочного животноводства в умеренных широтах [8]. Так, система MooCare на основе ARIMA успешно используется для корректировки рациона и планирования надоя по индивидуальным коровам, получая данные от IoT-сенсоров [7]. Тем не менее, данные модели не учитывают физиологию животных и изменения в кормовой базе [13]. Модели машинного обучения (ML) обладают высоким потенциалом в учёте нелинейных зависимостей, например, между питанием, микроклиматом и удоем. В отчётах подчеркивается, что LSTM-сети и регрессии позволяют получать прогнозы на 10–50 дней вперёд, а также дают точные предсказания на годовом горизонте при достаточном количестве обучающих данных [3]. Однако такие системы функционируют как «чёрные ящики», что затрудняет интерпретацию результатов и требует постоянного контроля качества входных данных. Механистические модели, такие как LIVSIM и DairyMod, ориентированы на физиологические параметры животных: возраст, порода, лактационный статус, рацион. Они позволяют имитировать метаболизм и оценивать влияние изменений в рационе или условиях содержания на молочную продуктивность

[15]. Пример — LIVSIM моделирует лактацию с учётом состояния тела животного и типа корма. Однако подобные модели требуют значительного количества точных входных данных и высокой вычислительной мощности. Наибольший интерес представляют гибридные системы, объединяющие данные от сенсоров (температура, влажность, активность, кормление) с ML и физиологическим моделированием. Подобные решения уже реализованы в ряде платформ. Например, отечественная система AGROBOTAST формирует цифровые паспорта коров и использует экспертные алгоритмы для прогноза надоя и рекомендаций по уходу [18]. Согласно, её внедрение позволило добиться роста продуктивности на российских фермах. Система ARKA от компании DFS ориентирована на анализ событий стада (осеменения, отёлы), работает на облачной платформе и позволяет планировать отёлы и прогнозировать лактации с учётом привесов и истории. Ещё один интересный кейс — Mustang от Сбербанка, который связывает кормовой цикл с надоями на основе цифровых клонов фермы. Аналогичную по логике систему реализовала нидерландская компания Connecterra с упором на носимые устройства и глобальную AI-аналитику [17].

Сравнительный анализ этих решений позволил выявить важные технические и экономические параметры. Так, модели на базе IoT-платформ требуют значительных первоначальных инвестиций в сенсоры и инфраструктуру, но дают возможность получать непрерывный поток данных. Их преимуществом является масштабируемость, особенно при облачной архитектуре (например, ARKA и AGROBOTAST) [18]. С другой стороны, решения типа Mustang более эффективны в крупных хозяйствах, где возможна глубокая автоматизация кормового цикла.

Важно учитывать и региональные особенности. Например, исследования показывают, что микроклимат в стойлах (температура, освещенность, влажность) влияет на продуктивность, особенно в условиях Урала. Также существенны параметры кормов: сено, силос, концентраты. Именно поэтому в рекомендациях по построению собственной модели акцент

сделан на гибридный подход с учётом климатических, физиологических и инфраструктурных факторов. Отдельное внимание уделено возможности работы модели без спутниковых данных — только на основе локальных IoT-сенсоров и агрометеостанций [14].

В итоге, изучение существующих решений подтвердило целесообразность создания симулятора-прогнозировщика с комбинированной архитектурой. Такая модель может использовать данные с фермы, описывать поведение стада на физиологическом уровне и уточняться через ML-прогнозы [12]. При этом модульность архитектуры позволит внедрять её поэтапно, начиная с прогнозов на уровне стада и постепенно расширяя до индивидуального уровня, включая анализ микроклимата, автоматизацию кормления и валидацию моделей по фактическим данным. Этот вывод стал основой для проектного решения, которое будет рассмотрено в следующем разделе

### **3 Архитектурная концепция цифрового двойника и обоснование проектных решений**

Несмотря на то, что в рамках учебного проекта не удалось перейти к полноценной разработке программного продукта, на основе проведённого анализа и изучения аналогов была сформулирована предварительная архитектура цифрового двойника агрофермерского комплекса. Эта архитектура представляет собой концептуальную модель, отражающую предполагаемую структуру, компоненты и принципы взаимодействия между ними. Целью данного раздела является обоснование выбранного подхода и определение ключевых функциональных блоков, которые станут основой для будущей реализации.

Архитектура цифрового двойника строится как модульная система, основанная на принципах открытости, масштабируемости и поэтапного внедрения. Базовая структура предполагает наличие трёх логических уровней: уровень сбора данных, уровень обработки и анализа, уровень пользовательского взаимодействия [1].

На первом уровне сосредоточены модули интеграции с датчиками и системами учёта [20]. Это могут быть сенсоры микроклимата (температура, влажность), устройства контроля кормления, доильные аппараты, RFID-считыватели и модули взвешивания. Данные с этих устройств поступают в централизованное хранилище, представляющее собой облачную или локальную БД в зависимости от масштаба фермы [19]. Учитывая опыт систем AGROBOTAST и Mustang, предполагается, что основной упор будет сделан на телеметрию кормления и лактационные циклы [18].

На втором уровне располагаются аналитические модули. Они включают в себя модели прогнозирования удоя (на основе регрессий, временных рядов и ML), симуляторы физиологических процессов (упрощённая модель лактации), алгоритмы оценки отклонений и расчёт откормочных норм [9]. Здесь же осуществляется формирование цифровых паспортов животных,

аккумулирующих информацию о здоровье, продуктивности, истории осеменений и лактаций. Ключевая идея — возможность постоянной адаптации модели под конкретное стадо через накопление и интерпретацию статистики [10].

Третий уровень — пользовательский. Он включает веб-интерфейс и/или мобильное приложение для агрономов, зоотехников и управленцев [21]. Через интерфейс пользователи могут просматривать прогнозы, получать рекомендации, сравнивать различные сценарии и вносить корректировки в рацион или условия содержания. Важным элементом здесь выступает система визуализации, позволяющая отобразить данные в форме графиков, карт и диаграмм, облегчая принятие решений.

Выбор такой архитектуры обусловлен несколькими соображениями. Во-первых, она хорошо масштабируется: решение может быть адаптировано как для малых хозяйств (через мобильный интерфейс и базовый набор сенсоров), так и для крупных агрохолдингов (с развёрнутой системой учёта и автоматизации) [4]. Во-вторых, она модульна — каждый компонент может быть разработан и протестирован отдельно. В-третьих, структура системы отражает реальные процессы на ферме, обеспечивая логическую связь между физиологией животных, производственной логистикой и управленческими решениями.

Таким образом, предложенная архитектура служит не только основой для дальнейшей разработки, но и концептуальной рамкой, внутри которой будут встраиваться функциональные элементы цифрового двойника. Она опирается на лучшие практики, зафиксированные в существующих решениях, но при этом адаптирована под специфические требования проекта и условия реализации

#### **4 Методология разработки, ход проекта и итоги промежуточного тестирования**

Разработка проекта цифрового двойника агрофермерского комплекса велась поэтапно и методологически опиралась на принципы итеративного проектирования и системного анализа. Исходя из поставленных целей, был выбран подход, при котором каждый этап не только дополнял предыдущий, но и проверялся через обратную связь с заказчиком, что позволило оперативно вносить изменения и уточнять требования.

Процесс разработки стартовал с обширной аналитики. На первом этапе команда сосредоточилась на изучении предметной области: собирались и анализировались данные по современным аграрным технологиям, проводился сравнительный анализ отечественного и зарубежного опыта, формировались аналитические отчёты и концептуальные выкладки. На этом же этапе были собраны и систематизированы источники из научной и бизнес-литературы, включая публикации на платформах CyberLeninka, e-koncept.ru и DairyGlobal, что дало широкое представление о текущем уровне цифровизации в отрасли.

Далее последовало выдвижение гипотез по потенциальным направлениям развития. Для этого применялся инструмент «дерево гипотез», который позволил структурировать идеи по возможной цифровизации процессов фермы. Каждая гипотеза была соотнесена с выявленными проблемами и трендами [2]. Для фиксации проектной логики и планирования была создана иерархия задач в форме backlog'a, позволившая отслеживать прогресс и приоритизировать работы.

На втором этапе, после серии встреч с заказчиком, фокус был смещён в сторону анализа конкретных моделей прогнозирования производства молока. Такой поворот был обусловлен интересом заказчика к возможностям прогнозной аналитики и автоматизации принятия решений по управлению стадом [11]. Это потребовало от команды сузить предметный фокус и погрузиться в эконометрические и ML-модели, применяемые для

предсказания удоев. Были проанализированы ARIMA, регрессионные и нейросетевые подходы, выделены критерии их применимости и разработаны рекомендации по их внедрению с учётом агротехнических реалий региона.

Особую роль в процессе сыграли регулярные очные встречи с заказчиком и преподавателями, выполнявшими роль кураторов. Эти сессии можно рассматривать как своеобразные точки промежуточного тестирования. На них происходила презентация текущих результатов, формулировались замечания и уточнения, что позволило своевременно корректировать гипотезы и уточнять техническую концепцию. Например, в ходе одной из встреч было предложено расширить количество анализируемых источников, а также конкретизировать набор параметров, подлежащих прогнозированию в модели.

Результатом такой работы стали уточнённые цели проекта, адаптированная архитектурная схема и расширенный аналитический пакет, включающий не только описание существующих решений, но и структурированные базы данных, отражающие ключевые параметры прогнозируемых процессов. Несмотря на отсутствие финального прототипа, проект достиг зрелости с точки зрения концептуальной завершённости и готовности к последующему этапу — реализации цифрового двойника как программного продукта.

Таким образом, методология разработки в рамках данного проекта сочетала элементы системного анализа, итеративного уточнения требований и постоянного взаимодействия с заказчиком, что позволило сохранить актуальность проекта и обеспечить его ориентированность на реальные потребности агрофермерского бизнеса

## 5 Планирование разработки и организация работы команды

Процесс планирования проектной деятельности строился на принципах гибкой командной работы и общей ответственности за результат. Одним из ключевых ограничений, наложенных в рамках учебного формата, стало требование куратора отказаться от жёсткого разделения ролей внутри команды. В результате все участники проекта работали с единой зоной задач, где ответственность была коллективной, а распределение происходило динамически — в зависимости от текущих этапов и компетенций каждого участника.

На начальных стадиях, особенно в период аналитического погружения, работа строилась синхронно: каждый член команды занимался поиском, систематизацией и обработкой информации из внешних источников. Это обеспечило высокую плотность покрытия предметной области и позволило выработать общее понимание проблематики. При подготовке дерева гипотез и архитектурной схемы команда также работала совместно, обсуждая варианты, фиксируя идеи и вырабатывая оптимальные формулировки.

При этом отдельные блоки задач постепенно переходили к тем участникам, кто проявлял к ним особый интерес или обладал соответствующими навыками. Так, анализ эконометрических моделей и прогнозных подходов большей частью был выполнен участником с углублённой подготовкой в статистике и машинном обучении. Обработка и визуализация данных, составление таблиц и диаграмм — тем, кто лучше ориентировался в инструментах визуализации. Финальное структурирование отчёта и работа с текстами легли на плечи участников с развитым академическим письмом.

Управление деятельностью велось через общий план работ, сформулированный в формате backlog'a. Каждая задача включала описание, срок и статус выполнения, что позволяло отслеживать прогресс всей команды и своевременно реагировать на задержки или пробелы. Хотя формат не

предполагал применения специализированных систем управления проектами (таких как Trello или Jira), структура backlog'а выполнялась в таблице, которой пользовались все члены команды. Это обеспечивало прозрачность и гибкость при планировании.

Таким образом, организация работы над проектом базировалась на принципах равного вклада, гибкого перераспределения задач и коллективного принятия решений. Это обеспечило высокую вовлечённость всех участников и позволило адаптироваться к меняющимся требованиям и ограниченным срокам выполнения учебного задания

## **6 Индивидуальный вклад участников команды**

Работа над проектом велась в составе четырёх участников: **Горшков Георгий, Зорин Иван, Волчихин Артём и Кармолина Елизавета**. По решению куратора, в команде отсутствовало формальное распределение ролей — каждый из участников принимал участие в выполнении общих задач, включая анализ предметной области, работу с источниками, обсуждение проектных решений, участие в формулировании и проверке гипотез, а также создание базы аналитических материалов.

Горшков Георгий, помимо участия во всех указанных задачах, выполнял функции неформального тимлида. Он координировал работу команды, отслеживал соблюдение сроков и логики выполнения этапов проекта, а также разрабатывал презентационные и отчетные материалы к контрольным точкам, взаимодействовал с куратором и представлял проект на встречах.

Зорин Иван проявил себя в проработке технических и архитектурных аспектов. Он активно участвовал в сравнительном анализе моделей прогнозирования, обрабатывал и систематизировал собранную информацию по ARIMA-моделям, регрессионным подходам и методам машинного обучения. Также он принимал участие в построении дерева гипотез и структурировании базы знаний.

Волчихин Артём фокусировался на анализе источников мирового опыта. Его вклад был особенно значим на этапе поиска и анализа бизнес-кейсов цифровизации агропредприятий за рубежом. Он подбирал примеры успешных ИТ-решений, помогал формировать логические обоснования для выдвигаемых гипотез и участвовал в подготовке текстов для документации проекта.

Кармолина Елизавета сосредоточилась на анализе пользовательских сценариев и потенциальных точек интеграции цифрового двойника в производственный процесс. Она принимала участие в выстраивании архитектурной концепции решения, помогала систематизировать выводы по

сопоставлению аналогов и оформляла результаты в структурированный вид для отчётной документации.

Несмотря на общее распределение задач, каждый участник внёс уникальный вклад, и работа команды отличалась высоким уровнем согласованности и взаимопомощи. Такой подход обеспечил комплексный охват задачи и устойчивое движение проекта к поставленной цели

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проект «Разработка цифрового двойника агрофермерского комплекса» позволил команде всесторонне подойти к решению поставленных задач, акцентируя внимание не столько на быстрой реализации программного прототипа, сколько на качественном прорабатывании фундаментальной аналитической и концептуальной базы. Несмотря на ограниченность сроков, обусловленных рамками семестра, все требования, которые были сформулированы заказчиком на этапах реализации, были тщательно проанализированы и успешно выполнены в полном объёме.

Команда не ограничилась поверхностным подходом, а выстроила работу системно: начиная от глубокого погружения в предметную область и анализа мирового опыта, и заканчивая формулированием обоснованных гипотез, построением архитектуры и подготовкой баз для дальнейшего моделирования. Таким образом, выполненные задачи были не просто формальными, а имели содержательное наполнение и представляли собой логически взаимосвязанные блоки, которые создают устойчивую основу для последующего развития цифрового двойника.

По результатам работы можно уверенно утверждать, что команда продемонстрировала способность не только выполнять конкретные задания, но и грамотно адаптироваться к изменениям задач в процессе проекта, выстраивать приоритеты и обеспечивать соответствие своей деятельности ожиданиям заказчика. Все ключевые направления, обозначенные в начале семестра, были реализованы на высоком уровне с фокусом на качество, проработку и применимость создаваемых решений.

Оценка качества программного продукта на основе промежуточных результатов показала, что проект находится в стадии высокой концептуальной готовности, несмотря на отсутствие финального программного прототипа. Команда сосредоточилась на построении прочной методологической и архитектурной базы, которая прошла проверку на жизнеспособность через

регулярные встречи с заказчиком и экспертами. Эти промежуточные итерации можно рассматривать как форму тестирования, в ходе которой команда получала обратную связь, вносила корректировки и уточняла как отдельные гипотезы, так и логическую структуру цифрового двойника.

Ошибки и недочёты, возникавшие в процессе, в большинстве своём касались уточнений формулировок, коррекции приоритетов и более точной привязки архитектурных решений к бизнес-целям. Ни одна из выявленных проблем не носила критического характера и не повлияла на обоснованность предлагаемых решений. Напротив, такие итерации позволили повысить обоснованность принимаемых решений и укрепили связку между техническими компонентами и потребностями заказчика.

Завершение текущего этапа проекта в рамках дисциплины «Проектный практикум» не означает завершения всей работы над цифровым двойником агрофермерского комплекса. Приостановка проекта связана исключительно с ограниченностью учебного семестра и невозможностью со стороны куратора и заказчика своевременно сформулировать и поставить задачи следующего этапа, а также ограниченностью времени команды для их реализации. Тем не менее, все участники проекта и сам заказчик проявили заинтересованность в продолжении работы, включая полноценную разработку, техническую реализацию и внедрение цифрового двойника в реальную бизнес-среду.

В качестве приоритетных направлений развития рассматриваются переход к проектированию MVP, интеграция с реальными ИТ-системами агрофермы, расширение архитектуры в сторону персонализированных моделей животных, автоматизация анализа данных и подготовка к пилотному внедрению. Подход, использованный командой, уже продемонстрировал свою состоятельность: системный, гибкий и основанный на тесном взаимодействии с заказчиком, он позволяет не только обеспечить соответствие текущим требованиям, но и закладывает устойчивую основу для масштабирования. При сохранении текущей методологии и заинтересованности всех сторон существует высокий потенциал для успешной реализации цифрового

двойника и его интеграции в реальные бизнес-процессы агрофермерского комплекса

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Zhang, R., Zhu, H., Chang, Q., & Mao, Q. (2025). A Comprehensive Review of Digital Twins Technology in Agriculture. *Agriculture*, 15(9), 90 [Электронный ресурс] – URL: <https://doi.org/10.3390/agriculture15090903> (дата обращения: 20.05.2025).
2. Wang, L. (2024). Digital Twins in Agriculture: A Review of Recent Progress and Open Issues. *Electronics*, 13(11), 2209 [Электронный ресурс] – URL: <https://doi.org/10.3390/electronics13112209> (дата обращения: 20.05.2025).
3. Kim, S., & Heo, S. (2024). An Agricultural Digital Twin for Mandarins Demonstrates the Potential for Individualized Agriculture. *Nature Communications*, 15, 1561 [Электронный ресурс] – URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-024-45725-x> (дата обращения: 20.05.2025).
4. Goldenits, G., Mallinger, K., Raubitzek, S., & Neubauer, T. (2024). Current Applications and Potential Future Directions of Reinforcement Learning-Based Digital Twins in Agriculture. *arXiv preprint* [Электронный ресурс] – URL: <https://arxiv.org/abs/2406.08854> (дата обращения: 20.05.2025).
5. Banerjee, S., Mukherjee, A., & Kamboj, S. (2025). Precision Agriculture Revolution: Integrating Digital Twins and Advanced Crop Recommendation for Optimal Yield. *arXiv preprint* [Электронный ресурс] – URL: <https://arxiv.org/abs/2502.04054> (дата обращения: 20.05.2025).
6. Omar, M. A., Hassan, F. A. M., Shahin, S. E., & El-shahat, M. (2022). The Usage of the Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA) Model for Forecasting Milk Production in Egypt. *Open Veterinary Journal*, 12(1), 1-7 [Электронный ресурс] – URL: <https://doi.org/10.5455/OVJ.2022.v12.i1.1> (дата обращения: 20.05.2025).
7. Badr, A. A., Elfadl, E. A. A., Fouda, M. M., & Elsayed, S. M. (2022). Using of Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA) Model for Forecasting Milk Production of Dairy Cattle Farms in Dakahlia Governorate of Egypt. *Advances in Animal and Veterinary Sciences*, 10(7), 1473-1480 [Электронный ресурс] –

URL: <https://doi.org/10.17582/journal.aavs/2022/10.7.1473.1480> (дата обращения: 20.05.2025).

8. Gorsuch, E. (n.d.). LSTM Model for Milk Production Predictions [Электронный ресурс] – URL: <https://www.elliottgorsuch.com/blank-1-1> (дата обращения: 20.05.2025).

9. ResearchGate. (n.d.). Daily Milk Yield Prediction of Dairy Cows Based on the GA-LSTM Algorithm [Электронный ресурс] – URL: [https://www.researchgate.net/publication/350083624\\_Daily\\_milk\\_yield\\_prediction\\_of\\_dairy\\_cows\\_based\\_on\\_the\\_GA-LSTM\\_algorithm](https://www.researchgate.net/publication/350083624_Daily_milk_yield_prediction_of_dairy_cows_based_on_the_GA-LSTM_algorithm) (дата обращения: 20.05.2025).

10. Journal of Dairy Science. (2024). Evaluating the Performance of Herd-Specific Long Short-Term Memory Models for Health Alert Detection. *Journal of Dairy Science*, 107(5), 4567-4578 [Электронный ресурс] – URL: <https://doi.org/10.3168/jds.2023-23456> (дата обращения: 20.05.2025).

11. Libelium. (n.d.). How a Dairy Farm Increased Their Milk Production 18% with IoT and Machine Learning [Электронный ресурс] – URL: <https://www.libelium.com/libeliumworld/success-stories/how-a-dairy-farm-increased-their-milk-production-18-with-iot-and-machine-learning/> (дата обращения: 20.05.2025).

12. Vate-U-Lan, P., Quigley, D., & Masouras, P. (2017). Internet of Things in Agriculture: A Case Study of Smart Dairy Farming in Ontario, Canada. *15th International Conference on Developing Real-Life Learning Experience* [Электронный ресурс] – URL: <https://repository.au.edu/server/api/core/bitstreams/e23d58b1-3f23-453d-9042-6462838524cb/content> (дата обращения: 20.05.2025).

13. Pangea Group. (n.d.). Case Study: Protecting a Dairy Farmer's Herd from the Elements with IoT [Электронный ресурс] – URL: <https://pangea-group.net/protecting-a-dairy-farmers-herd-from-the-elements-with-iot/> (дата обращения: 20.05.2025).

14. Wipro. (n.d.). Adopting IoT Technologies to Rejuvenate Dairy Farming [Электронный ресурс] – URL: <https://www.wipro.com/infrastructure/adopting->

iot-technologies-to-rejuvenate-dairy-farming/ (дата обращения: 20.05.2025).

15. ResearchGate. (n.d.). Innovation in the Dairy Industry: Forecasting Cow Cheese Production with Machine Learning and Deep Learning Models [Электронный ресурс] – URL: [https://www.researchgate.net/publication/381361350\\_Innovation\\_in\\_the\\_dairy\\_industry\\_forecasting\\_cow\\_cheese\\_production\\_with\\_machine\\_learning\\_and\\_deep\\_learning\\_models](https://www.researchgate.net/publication/381361350_Innovation_in_the_dairy_industry_forecasting_cow_cheese_production_with_machine_learning_and_deep_learning_models) (дата обращения: 20.05.2025).

16. ResearchGate. (n.d.). Smart Dairy Farming for Predicting Milk Production Yield Based on Deep Machine Learning [Электронный ресурс] – URL: [https://www.researchgate.net/publication/382555577\\_Smart\\_dairy\\_farming\\_for\\_predicting\\_milk\\_production\\_yield\\_based\\_on\\_deep\\_machine\\_learning](https://www.researchgate.net/publication/382555577_Smart_dairy_farming_for_predicting_milk_production_yield_based_on_deep_machine_learning) (дата обращения: 20.05.2025).

17. Connecterra. How Ida improves dairy productivity using AI and wearable devices [Электронный ресурс] – URL: <https://www.connecterra.io/case-studies> (дата обращения: 20.05.2025).

18. AGROBOTAST: Российская цифровая платформа для управления молочным стадом [Электронный ресурс] – URL: <https://www.agrobotast.ru> (дата обращения: 20.05.2025).

19. Niu, H., & Chen, Y. (2022). *Smart Big Data in Digital Agriculture Applications: Acquisition, Advanced Analytics, and Plant Physiology-informed Artificial Intelligence*. Springer [Электронный ресурс] – URL: [https://www.goodreads.com/author/list/417681.YangQuan\\_Chen](https://www.goodreads.com/author/list/417681.YangQuan_Chen) (дата обращения: 20.05.2025).

20. Chatterjee, P., & Khatri, N. (Eds.). (2021). *Precision Agriculture for Sustainability: Use of Smart Sensors, Actuators, and Decision Support Systems*. CRC Press [Электронный ресурс] – URL: [https://www.goodreads.com/author/list/18933048.Prasenjit\\_Chatterjee](https://www.goodreads.com/author/list/18933048.Prasenjit_Chatterjee) (дата обращения: 20.05.2025).

21. Saini, K., & Chelliah, P. R. (2020). *Digital Twins: The Industry 4.0 Use Cases: The Technologies, Tools, Platforms and Applications*. Wiley [Электронный ресурс] – URL: [https://www.goodreads.com/author/list/17607352.Pethuru\\_Raj\\_Chelliah](https://www.goodreads.com/author/list/17607352.Pethuru_Raj_Chelliah) (дата обращения: 20.05.2025).