



ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ БУДУЩЕГО

Сборник научных трудов
по материалам Всероссийской научной конференции
с международным участием «Зодчий будущего»

Нижний Новгород
2026

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»
Российская академия архитектуры и строительных наук

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ БУДУЩЕГО

Сборник трудов
по материалам Всероссийской научной конференции
с международным участием «Зодчий будущего»,
ННГАСУ, 10 апреля 2026 г.

Нижний Новгород
ННГАСУ
2026

УДК 004:005.745
ББК 73
Ц 75

Материалы публикуются в авторской редакции

Цифровые технологии будущего : сборник научных трудов по материалам Всероссийской научной конференции с международным участием «Зодчий будущего» (Н.Новгород, ННГАСУ, 10 апреля 2026 г.) / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет ; ответственный редактор Е. В. Конопацкий. – Нижний Новгород : ННГАСУ, 2026. – 106 с.: ил. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – ISBN 978-5-528-00657-4. – Текст : электронный.

Сборник научных трудов включает материалы секции «Цифровые технологии будущего» Всероссийской научной конференции с международным участием «Зодчий будущего», которая проходила в ННГАСУ 10 апреля 2026 г. Председатель секции – доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе и цифровому развитию ННГАСУ Е. В. Конопацкий, ученый секретарь – Председатель Совета молодых учёных ННГАСУ А. К. Ситникова.

СОДЕРЖАНИЕ

Анохина К.А. Виртуальная доска как инструмент преподавания в современном мире	4
Бабель А.В. Человек и его цифровой двойник: границы идентичности в эпоху ИИ.	8
Бондарева Н.А. Гибридный методологический подход к генерации сложных криволинейных форм в задачах визуализации	13
Волкова Е.М. Информационные технологии в подготовке архитектурно-строительных кадров	21
Высоцкий Л.Д., Тараканов Д.А. Особенности и ограничения синтеза русской речи в TTS моделях	24
Прокопенко Н.Ю., Гоголева Я.Д. Интеграция MLOPS в LOGINOM для аналитики данных маркетинговых	26
Кислицын Д.И., И.И. Карпов Сжатие изображений: эффективность и перспективы	30
Конопацкий Е.В., Кожанова К.Ю. Проблема визуализации твердотельных моделей в САПР: современное состояние и перспективы развития	34
Лоточ Е.Ю., Лемешко Б.Ю. Инструмент для динамического анализа обучения нейросетей	44
Кузюков Е.В., Мусин А.Р., Блинов А.В. Мобильный автоматизированный агро-блок как элемент жизнеобеспечения современных арктических станций: от транспортной базы к энергоэффективным технологиям	53
Прокопенко А.С. Разработка прототипа имитационной модели транспортного процесса на внутренних водных путях	59
Бурденко Е.В., Радуга М.И. Цифровое производство и материалы будущего	65
Данилкин В.В., Зыкова А.С., Стожаров О.Е., Рыжов С.А. Разработка модуля визуализации purbs-кривых на основе внешних данных в СПЖЦ «САРУС»	68
Филосова Е.И., Салимов Д.И., Донцов А.А., Мамылов М.А. Разработка системы сегментации и метрического анализа органов растений на основе архитектуры U-NET	72
Уткин М.О., Федорова Е.В., Дмитриев А.В. Методы математического расчета теплового потока от заглубленной трубы в грунте	76
Ляпунова Е.В., Чжен А.О., Курская А.С. От когнитивной карты к JSON-файлу: реализация средства автоматической стилизации дашбордов	83
Амерханов Л.А., Шохин Н.С., Суханова Н.Т. Архитектура кроссплатформенной системы централизованного управления мультимедийным контентом с поддержкой гибридного режима работы	87
Фомин А.Г., Юников С.Р. Кросс-языковое MMPI-тестирование больших языковых моделей как методический модуль поведенческого фенотипирования в когнитивно-экспериментальной оценке их обучения	91
Попов Е.В., Юрченко П.В. Визуализация изображений объектов на спутниковых снимках в системах машинного зрения	96
Уманский А.А., Суханова Н.Т., Тарасов А.Д., Терехин Е.В. Синтез адаптивных методов детекции коллизий для реалистичного взаимодействия объектов в виртуальной реальности	100

ВИРТУАЛЬНАЯ ДОСКА КАК ИНСТРУМЕНТ ПРЕПОДАВАНИЯ В СОВРЕМЕННОМ МИРЕ

К.А. Анохина, ассистент

*Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет,
Нижний Новгород
AnochinaKsenia@yandex.ru*

Аннотация. В докладе раскрывается потенциал виртуальной доски как современного инструмента преподавания, применимого в различных образовательных форматах. В работе систематизированы основные возможности доски и приведены конкретные практические примеры использования данного инструмента на разных дисциплинах. Результаты исследования демонстрируют рост вовлеченности обучающихся и оптимизацию рабочего процесса преподавателя. Показано, что виртуальная доска становится важным элементом цифровой трансформации образования, помогая реализовывать современные педагогические подходы.

Введение

В современном мире ИТ стало частью определения прогресса в стране и мире. Сфера образования также активно интегрирует цифровые технологии, трансформируя традиционные методы обучения. Одним из наиболее перспективных инструментов в этом процессе становится виртуальная доска – цифровой аналог классической классной доски с расширенным функционалом.

Целью статьи является раскрытие потенциала виртуальной доски как универсального инструмента преподавания и раскрытие преимуществ перед меловыми досками.

Актуальность темы обусловлена многими факторами. Из наиболее важных можно выделить рост спроса на дистанционные и смешанные форматы обучения; необходимость повышения вовлеченности обучающихся; тренд цифровой трансформации всех сфер жизни, включая образование.

Мощнейшим и главным толчком к полному внедрению ИТ в сферу образования стала пандемия COVID-19, которая полностью изменила обычное представление обучения. Переход на дистанционное образование был вынужденной мерой, который дался трудно. COVID-19 нанес не только разрушительное воздействие, но и позволил взглянуть на возможности ИТ под новым углом. Именно поэтому после окончания пандемии тенденция к склонности к дистанционному образованию не ушла. Это оказалось удобно для многих людей.

Тренд на цифровизацию всех процессов возник ранее пандемии и с каждым годом он все актуальнее. Это заметно упрощает жизнь людей и делает ее интереснее для многих.

Основные возможности виртуальной доски

Виртуальная доска представляет собой интерактивное рабочее пространство, доступное из любой точки мира.

Основная и самая важная функция виртуальной доски – это совместное редактирование в режиме реального времени. Именно в этом и заключается ее преимущество перед обычными меловыми досками. Несколько пользователей могут одновременно работать с материалами, вносить правки и оставлять комментарии, что является несомненным плюсом для групповой работы. Кроме того, пользователи могут находиться как в одном помещении, так и работать из разных точек мира. Функциональность и связь между преподавателем и студентом останется в любом случае.

Мультимедийность виртуальных досок обеспечивает гибкость ее применения на разных дисциплинах. На онлайн-досках можно работать с текстом, его форматированием и редактированием, с изображениями и схемами, с аудио- и видеофайлами, с гиперссылками на другие ресурсы. Виртуальная доска - универсальный способ работы с информацией любого вида.

Кроме работы с готовыми материалами, на виртуальной доске можно использовать инструменты для рисования. Создавать свои схемы, заметки и даже рисунки. Таким образом, доска становится холстом для проявления творческих способностей.

По завершении занятия преподаватель может воспользоваться функциями интерактивных элементов. Создать опрос, тест или интерактивное упражнение в качестве домашнего задания.

Сохранение и экспорт виртуальной доски позволит сохранить материалы до следующих занятий или продолжить работу позже.

Интеграция с другими сервисами и управление доступом помогает преподавателям, которые проводят занятия в дистанционном формате. Всегда можно подключиться к видеоконференциям, а также настроить права для разных пользователей.

Виртуальные доски имеют множество функций. при этом разные доски могут быть различными по наполнению функционала. Каждый может найти то, что ему больше подходит. Например, преподаватель математики может использовать доску с встроенными формулами, чтобы не записывать их каждый раз. А студент-дизайнер может найти доску с различными инструментами для рисования и воплощать свои идеи на доске, не имея при себе карандашей.

Практические примеры использования виртуальной доски

Рассмотрим, как виртуальная доска применяется на разных дисциплинах.

Например, в лингвистике и на дисциплинах, изучающих иностранные языки преподаватель может рисовать схемы времен и изменения структуры предложений в зависимости от времени. Добавляя примеры предложений, можно воспользоваться цветовым выделением для ключевых элементов. Задания на аудирование частая практика для иностранных языков, а в виртуальной доске нет для этого ограничений. Это позволяет преподавателю добавлять материалы с заданиями и совместно со студентами работать с данными без ограничений.

В математике и точных науках виртуальная доска нужна для решения задач с визуализацией формул и графиков. Совместное и поэтапное решение задач может быть плюсом. Построение геометрических фигур с использованием встроенных инструментов онлайн-доски становится проще.

Для гуманитарных наук большая часть функционала виртуальных досок может не понадобиться. Но для записи важных дат исторических событий или для сравнительного анализа текстов в литературе интерактивная доска также может быть полезна. Кроме того, можно использовать видеофайлы для привлечения внимания студентов.

В естественных науках виртуальную доску можно использовать как инструмент для рисования схем. Например, на биологии нарисовать схему фотосинтеза или на физике смоделировать движение тел. Формулы также можно записать и выделить для визуального восприятия и запоминания.

На творческих дисциплинах можно использовать инструменты для рисования – карандаш, перо, заливка, штрихи и многое другое. Студенты могут совместно выполнять эскизы и наброски, разрабатывать дизайн-проекты. Линии и различные фигуры могут пригодиться для построения чертежей.

Таким образом, каждый преподаватель может найти и выделить функции, которые для него важнее. На каждой дисциплине можно внедрить использование виртуальной доски. Онлайн-доска показывает себя как многофункциональный и универсальный инструмент,

подходящий многим. А дистанционные занятия по любой дисциплине, несомненно, нуждаются в подобных технологиях.

Преимущества использования виртуальных досок

Чтобы выявить преимущества использования виртуальных досок был проведен опрос и проанализированы результаты. Опрос проводился для двух групп: для обучающихся и для преподавателей.

В результате опроса было выявлено, что для большей части обучающихся стало интереснее на занятиях за счет интерактивности и наглядности. Раньше они просто слушали лекции и выполняли обычные задания в тетрадях. А с использованием виртуальных досок упражнения и задания стали более разнообразными.

Многие отнесли к плюсам использование материалов в дальнейшем, так как существует возможность сохранить рабочее пространство и не писать весь материал вручную в тетрадях.

Преподаватели, проходившие опрос, являются учителями школ, колледжей, ВУЗов, а также репетиторами. Но результаты по данной категории были схожи в различных подгруппах.

Для преподавателей важнейшим плюсом стала оптимизация рабочего процесса, а именно подготовки к занятиям. Все материалы успешно можно использовать повторно, удаляя лишние элементы.

Интерактивные упражнения экономят время на создании и проверке домашнего задания, что также является преимуществом виртуальной доски. Также интерактивные упражнения с большим энтузиазмом выполняются студентами.

Групповую работу вне зависимости от формы проведения занятий оценили по достоинству и обучающиеся, и преподаватели.

Таким образом, для образовательного процесса в целом виртуальная доска может стать хорошим инструментом для реализации современных педагогических подходов. Накопление базы цифровых образовательных ресурсов является преимуществом по сравнению с бумажными носителями. Интеграция цифровых средств в обучение привлекает студентов и позволяет сделать процесс учебы интереснее. Возможность учиться из любой точки мира делает образование доступным.

Важно отметить, что опрос проходили студенты и преподаватели, работающие в разных формах обучения – очной, дистанционной и смешанной. Но преимущества были в каждой категории, что показывает и подтверждает актуальность использования цифровых технологий, в частности виртуальных досок.

Недостатки и ограничения использования виртуальных досок

Несмотря на многочисленные преимущества использования виртуальных досок в образовании, есть и минусы.

Самый важный недостаток онлайн-досок и, в целом, цифровых средств - зависимость от технического оснащения и преподавателей, и студентов, а также зависимость от интернет-соединения. Занимаясь в дистанционном формате, у каждого участника должны быть ноутбук/компьютер и интернет. Поскольку, изначально виртуальная доска разрабатывалась для онлайн-обучения, то без доступа к Интернету работа невозможна. Также интернет-соединение должно быть стабильным и высокоскоростным, иначе при совместной работе могут возникнуть большие проблемы. Слабые технические средства, имеющие недостаточную производительность, также могут привести к проблемам на занятии. Редко, но бывают проблемы с совместимостью ПО. Но в современном мире все платформы модернизируют, что позволяет устанавливать их на любое техническое средство.

Потребность в адаптации методик преподавания под новый инструмент тоже может стать трудоемким и занять много времени. Переработка традиционных конспектов и презентаций может занять значительное время. Однако преобразовав учебные материалы

один раз, можно использовать их в дальнейшем. Также первоначальное использование виртуальной доски может вызвать затруднения у пользователей, хотя чаще всего интерфейс онлайн-доскок адаптирован и интуитивно понятен.

Педагог должен освоить новые приемы преподнесения материала. Преподаватель должен быстро ориентироваться в функционале доски и эффективно использовать инструменты. Организовать групповую работу часто не просто, поэтому преподаватель должен уметь настроить такую работу, управляя вниманием каждого обучающегося.

Бесплатные версии некоторых платформ могут вносить свои ограничения. Многие популярные виртуальные доски предлагают бесплатные пробные тарифы с ограничением числа участников, времени или функций. Более того, в связи с санкционными ограничениями, ряд иностранных виртуальных досок прекратили свою работу. Доски, которые продолжают свою работу могут вызвать проблемы с оплатой. Риск блокировки и внезапного отключения может насторожить пользователей. Это является важнейшей проблемой на данный момент.

Чтобы минимизировать недостатки в работе с виртуальной доской необходимо проводить предварительную оценку технической готовности. И студент, и преподаватель должны быть готовы к внедрению нового инструмента обучения. Выбирать платформы с оптимальным соотношением функционала и доступности. Заранее провести анализ имеющихся средств. На данный момент лучше остановиться на отечественных аналогах, чтобы в процессе занятия не получить ограничения. Рекомендуется разрабатывать резервные сценарии. В случае, если все же что-то пошло не так, должен быть запасной вариант, например, материал в обычном текстовом документе. Наилучшим вариантом будет внедрять виртуальные доски постепенно, а не пытаться сразу перенести весь процесс в цифровой формат.

Таким образом, осознанный и ответственный подход к выбору и использованию виртуальных досок, учет всех недочетов помогут максимально эффективно использовать их преимущества, минимизируя возможные негативные последствия.

Заключение

Виртуальная доска – это не просто цифровой аналог меловой доски, а мощный многофункциональный инструмент, способный изменить образовательный процесс. Ее использование может способствовать повышению вовлеченности и мотивации обучающихся, а также оптимизации и упрощения рабочего процесса преподавателей. Также онлайн-доска позволяет реализовывать современные педагогические подходы и интегрировать цифровые технологии в образование.

Исследование показало, что виртуальные доски особенно эффективны при организации совместной работы студентов и поддержке смешанного или дистанционного форматов обучения.

Перспективы развития виртуальных технологий могут быть связаны с интеграцией искусственного интеллекта. Например, для проверки задания и оставления персонального отзыва.

Таким образом, виртуальная доска становится важнейшим элементом цифровизации образования, помогая реализовывать современные педагогические подходы и делая обучение более эффективным и доступным.

Литература

1. 25 лет эволюции российского образования. – URL: <https://25.hse.ru/development/story8>
2. Цифровая трансформация образования. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovaya-transformatsiya-obrazovaniya>
3. Онлайн-доски: как использовать для работы и учебы. – URL: https://kontur.ru/talk/spravka/53418-onlajn_doski_kak_ispolzovat_dlya_raboty_i_ucheby

ЧЕЛОВЕК И ЕГО ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК: ГРАНИЦЫ ИДЕНТИЧНОСТИ В ЭПОХУ ИИ

А.В. Бабель ¹, руководитель Центра Культурного сотрудничества

¹ *Российско-Китайская Палата по содействию торговле машинно-технической и инновационной продукцией, Москва*
alon.babel@yandex.ru

Аннотация. В статье рассмотрены философские и антропологические вопросы трансформации человеческой идентичности в условиях развития искусственного интеллекта. Применены методы сравнительного анализа и интерпретации феноменов цифровой культуры. Результаты анализа показали, что цифровые аватары и моделирование памяти способны воспроизвести внешние аспекты человеческого облика и паттернов поведения, но, в настоящее время, лишены «своего я». Отсутствие субъективности, уникального жизненного опыта и телесной конечности – ключевое различие между искусственным интеллектом и человеком. В связи с этим возникает необходимость разработки этических норм, регламентирующих границы вмешательства в природу человека и защиты концепции «подлинного» существования.

Введение

Развитие технологий искусственного интеллекта ставит перед современной философской наукой фундаментальный вопрос: где проходит граница между человеком и его цифровым образом? Сегодня мы сталкиваемся с ситуацией, когда внешность, голос и поведение человека становятся воспроизводимыми без его физического присутствия. Индивидуальные особенности внешности и паттерны поведения начинают рассматриваться как набор данных, доступных для обработки алгоритмами, и применяются при создании так называемых текстовых «промтов» (описаний), используемых для генерации аудиовизуальных произведений. Возникает экзистенциальный парадокс: внешняя визуальная оболочка (форма) существует, но содержание – уникальный жизненный опыт, сознание и память – отсутствует.

Как отмечают исследователи, в XXI веке формируется новая реальность, где люди обретают «цифровых аватаров», способных существовать независимо от своего прототипа. В западной академической традиции для описания этого феномена используется типология *Digital Doppelgängers* (Цифровые двойники), в рамках которой выделяют различные формы цифрового удвоения — от управляемых пользователем аватаров до автономных агентов на основе ИИ [1]. Актуальность темы обусловлена массовым внедрением генеративных технологий в повседневную жизнь. Например, в октябре 2025 года специалисты «Роскачества» сообщали о новой схеме мошенничества, при которой злоумышленники создают цифровых аватаров умерших людей и используют их для воздействия на родственников и знакомых¹. Параллельно в научной среде активно развивают направление исследований, посвящённых цифровым аватарам (*digital twins*) и различным последствиям их применения [2].

Следует отметить, что цифровизация идентичности сопровождается не только технологическими, но и культурными сдвигами, затрагивающими способы восприятия социума и само самовосприятие человека. Виртуальное пространство становится продолжением реальности, где личность может быть многократно модифицирована и размножена. Виртуальная реальность и её активное включение в повседневную жизнь не

¹ Роскачество зафиксировало мошенничество через нейросети с образами умерших. – URL: <https://vz.ru/news/2025/10/2/1363832.html>

только усиливают разрыв между биологическим существованием человека и его цифровыми проекциями, но и формируют новую парадигму существования в эпоху искусственного интеллекта.

Материалы и методы

Методологическую основу исследования составляют сравнительный анализ и интерпретация феноменов цифровой культуры. В работе использованы материалы научных исследований, опубликованных в рецензируемых журналах, и практические подходы к изучению цифровой идентичности, цифровых аватаров и трансформации субъективности, а также интернет-ресурсы новостного и практического направления в сфере искусственного интеллекта. Особое внимание уделено междисциплинарному подходу, сочетающему философский, культурологический и технологический анализ. Подобный подход позволяет рассмотреть феномен цифровых аватаров не только как техническое достижение, но и как социокультурное, философское и теологическое явление.

Результаты исследования

Исторический образ человека на протяжении веков был неотделим от его физического тела и жизненного опыта. Он формировался через биографию, память, личное присутствие, а также индивидуальные черты характера и внешности. Фотография, начиная от первых черно-белых снимков и заканчивая цифровым бумом, фиксировала уникальный момент, который уже никогда не повторится, подчеркивая конечность времени и смертность человека. Важным этапом трансформации визуальной памяти стало появление технологий «оживления» изображений посредством искусственного интеллекта. Современные сервисы, в том числе голосовые ассистенты, такие как Алиса Ai от Яндекса², позволяют анимировать статичные фотографии и даже создавать собственные сюжетные линии происходящего на этих фото посредством текстовых описаний (промтов). В результате фотография перестаёт быть фиксацией прошлого и превращается в интерактивную среду, способную не только имитировать присутствие, но и изменять восприятие исторических реалий.

Важно подчеркнуть, что традиционная модель идентичности предполагала непрерывность личного опыта и его уникальность. Любое воспроизведение личности рассматривалось как ограниченное и вторичное по отношению к оригиналу. В этом контексте цифровые технологии радикально меняют сам принцип репрезентации человека. Искусственный интеллект позволяет генерировать лица, синтезировать голоса и моделировать поведение на основе анализа больших данных. Таким образом, происходит переход от фиксированной идентичности к динамической и реконструируемой, но лишь на основании загруженных в систему данных. Между тем цифровые системы ИИ способны не только воспроизводить, но и дополнять личность новыми, не присущими ей характеристиками. Это создаёт предпосылки для появления гибридных форм существования человека в цифровой среде. Особое место в создании цифровых двойников занимает технология создания цифровых аватаров умерших. Она позволяет реконструировать образы ушедших людей, создавая эффект их «продолжения», что приводит к трансформации представлений о памяти, утрате и границах человеческого существования, а также ставит новые этические вопросы, связанные с допустимостью цифровой «жизни» личности после физической смерти.

Показательным примером коммерциализации и технологического развития подобных практик становится появление специализированных онлайн-платформ, предлагающих услуги по «воскрешению» близких на базе ИИ. В отличие от разовых медийных проектов, подобные платформы предполагают регулярное и длительное взаимодействие с цифровым двойником, что усиливает психологическое воздействие и формирует новые формы зависимости. При этом возникает ситуация, в которой граница между памятью как

² Алиса от Яндекса научилась «оживлять» фото. – URL: https://yandex.ru/company/press_releases/2022/1011

процессом осмысления прошлого и симуляцией общения с «сохранённой» личностью практически исчезает.

Характерным примером подобной практики служит южнокорейский проект виртуальной реконструкции умершего ребёнка, широко обсуждавшийся в научном и медийном пространстве в феврале 2020 года. В рамках телевизионного эксперимента с использованием технологий виртуальной реальности (VR) и ИИ была воссоздана цифровая модель девочки Найон, скончавшейся в возрасте 7 лет. На основе архивных видеозаписей, фотографий и воспоминаний семьи разработчики смоделировали внешность, мимику и поведенческие реакции ребёнка. Её мать, Чан Джи Сун, получила возможность взаимодействовать с цифровым образом дочери в иммерсивной среде: «разговаривать» с ней, наблюдать движения и даже совершать символические действия, такие как празднование дня рождения³. Данный кейс демонстрирует принципиальный сдвиг в понимании памяти: она перестаёт быть внутренним психическим процессом и превращается во внешнюю, технологически поддерживаемую систему воспроизведения образа. При этом возникает эффект «продлённого присутствия», при котором граница между воспоминанием и текущим опытом размывается. Такое размывание влечёт за собой не только индивидуально-психологические, но и социальные последствия. Когда память перестаёт быть внутренним, сугубо личным достоянием и становится объектом внешнего технологического конструирования, меняется сам способ переживания утраты. Ритуалы скорби, веками служившие для принятия смерти, постепенно вытесняются практиками симулятивного общения, где ушедший человек «присутствует» всегда, но его присутствие лишено подлинной диалогичности и конечности, свойственной живому общению. С одной стороны, подобные технологии могут выполнять терапевтическую функцию, помогая справиться с утратой. Сама Чан Джи Сун призналась, что встреча помогла ей принять потерю³. Но, с другой стороны, они порождают зависимость и необходимость постоянного взаимодействия с сгенерированными образами, подменяя собой естественные психологические процессы принятия смерти. Как отмечает М. Савин-Баден (M. Savin-Baden), современный человек существует в состоянии «цифровой привязанности» (*being digitally tethered*), при котором его идентичность оказывается тесно связанной с цифровыми артефактами, формируя новые формы обучения и экзистенциального опыта [2].

Развивая эту мысль, Х. Уртадо (J. Hurtado) анализирует феномен цифрового «бессмертия» в контексте техно-капитализма, подчеркивая риски превращения памяти и идентичности в объект эксплуатации. Он выделяет три тенденции техно-капитализма: расширение товарно-денежных отношений на новые сферы жизни, создание новых форм отчуждения и подчинение жизни накоплению частного капитала [3]. Применительно к цифровым аватарам умерших это означает, что память и скорбь — прежде интимные, неотчуждаемые аспекты человеческого существования — превращаются в объекты купли-продажи. Технологические компании предлагают услугу «сохранения» личности близкого человека за ежемесячную плату, фактически монетизируя утрату и формируя зависимость от цифрового суррогата. Человек, подписавшийся на такую услугу, оказывается в ловушке: отказ от неё означает повторное переживание утраты, а продолжение использования — добровольное принятие новых форм отчуждения, где даже память перестаёт принадлежать ему самому. В этом контексте нельзя обойти вниманием идеологическую рамку, которую задаёт Клаус Шваб — основатель Всемирного экономического форума в Давосе. Именно он ввёл в широкий оборот понятие «Четвёртая промышленная революция», описывая слияние физического, цифрового и биологического миров⁴. На первый взгляд, его риторика полна оптимизма: технологии призваны «служить человечеству». Однако, за фасадом прогресса, отчётливо проступают черты постгуманистического проекта, в котором человек перестаёт

³ Корейскую девочку «вернули» в реальность. — URL: <https://www.kommersant.ru/doc/4250861>

⁴ Schwab K. The Fourth Industrial Revolution. — URL: <https://www.weforum.org/pages/the-fourth-industrial-revolution-by-klaus-schwab/> (дата обращения: 04.06.2026).

быть мерой всех вещей и превращается в один из элементов гибкой, алгоритмически управляемой системы. Именно эта логика легитимирует превращение памяти в сервис, скорби — в подписку, а идентичности — в редактируемый файл.

Искусственный интеллект работает с информацией, выявляет закономерности и воспроизводит форму – внешность, голос, манеру поведения. Однако он не обладает опытом и не способен переживать события, менять своё поведение исходя из различных внешних обстоятельств. Отсутствие субъективности и феноменологического сознания на текущий момент делает цифровые аватары принципиально отличными от человека. Как подчеркивает Л. Флориди (L. Floridi), этический вызов ИИ заключается в том, что он функционирует как «действующий без намерения», имитируя моральные агенты, но не являясь ими на самом деле [4]. Даже при высокой степени правдоподобия цифровые модели остаются лишь симуляцией человека, но не равны ему.

Также распространение синтетических образов ведёт к снижению способности различать реальное и искусственное, а также к росту недоверия к информации. Возникает феномен антропоморфизации технологий, при котором пользователи начинают воспринимать алгоритмы как субъектов взаимодействия. Как отмечает Ш. Теркл (S. Turkle), люди парадоксальным образом начинают ожидать от технологий больше эмпатии, чем от окружающих людей, что ведет к «одинокости вместе» [5]. В долгосрочной перспективе подобная тенденция может привести к изменению социальных паттернов поведения, законодательных норм и способов коммуникации. Между тем в Российской Федерации уже идёт активная разработка законодательных норм, которые должны ввести рамочное регулирование применения ИИ. В частности, проект закона впервые закрепляет на законодательном уровне само понятие искусственного интеллекта, устанавливает права и обязанности участников рынка и вводит обязательную маркировку фото-, видео- и аудиоконтента, созданного с помощью ИИ⁵.

Отдельного внимания заслуживает использование технологий имитации личности в политической сфере. Практика «пранков» (розыгрышей), получившая широкую известность в Российской Федерации благодаря деятельности «Вована» и «Лексуса» (Владимир Кузнецов, Алексей Столяров)⁶, демонстрирует уязвимость даже высокопоставленных деятелей к манипуляциям с идентичностью. Используя подмену личности и цифровые средства коммуникации, пранкеры вступали в диалог с мировыми лидерами, выдавая себя за других лиц.

С развитием технологий синтеза голоса и генерации видео (*deepfake*) подобные практики приобретают качественно новый уровень. Если ранее ключевую роль играли сценарий, грим и актёрская игра, то в современных условиях достаточно алгоритмической модели, способной воспроизводить голос, интонации и визуальный облик.

В результате возникает новая форма информационного риска, при которой граница между реальным высказыванием политика и его цифровой имитацией становится трудно различимой, создавая предпосылки для дестабилизации коммуникационных процессов на международном уровне. Таким образом, проблема цифровых двойников выходит за пределы философского анализа и приобретает выраженное политическое и социальное измерение, становясь фактором, влияющим на вопросы доверия, легитимности и безопасности государства.

Заключение

Проведенный анализ позволяет утверждать, что развитие ИИ ставит перед человечеством вызов, выходящий далеко за рамки технологий. Меняется само представление о человеке и его сущности. Образ становится отделимым от тела, память – бесконечно

⁵ Минцифры разработало проект закона о госрегулировании применения искусственного интеллекта в РФ. – URL: <https://www.consultant.ru/legalnews/31108/>

⁶ Пранкеры Вован и Лексус: кто это и кого разыгрывали. – URL: <https://ria.ru/20220317/prankery-1778574887.html>

воспроизводимой, смерть – преодолимой. Цена этих трансформаций – риск утраты подлинности человеческого существования и замена живого переживания его имитацией. Особую тревогу вызывает тот факт, что имитация может оказаться психологически более комфортной, чем реальность. Цифровой аватар не спорит, не устаёт, не требует эмоциональных затрат. В перспективе это способно сформировать устойчивый потребительский спрос на «кастомизированных» собеседников — от умерших родственников до вымышленных личностей. Такой запрос, в свою очередь, будет стимулировать дальнейшее развитие технологий, замыкая цикл, в котором экономическая выгода оказывается важнее сохранения подлинно человеческих форм общения.

Как отмечает М. Савин-Баден, мы вступаем в эпоху, где от нас требуется переосмысление фундаментальных антропологических категорий [2], а Х. Уртадо предупреждает о рисках «эксплуатации бессмертия в техно-капитализме», где цифровые аватары становятся товаром, а память — источником прибыли [3]. Искусственный интеллект – мощный инструмент, усиливающий возможности человека, но он не может заменить человека. Он не способен обладать сознанием и способностью к осмысленному переживанию. Он не обращается к пережитому опыту, а лишь моделирует ситуацию на основании полученных данных. В настоящее время особую значимость приобретает необходимость разработки нормативных и этических механизмов регулирования использования цифровых аватаров. Без формирования чётких границ их применения возможно не только размывание понятия личности, но и углубление феномена «цифровой привязанности», меняющей структуру социальных связей. Перспективы дальнейших исследований связаны с анализом долгосрочного влияния цифровых технологий на человеческую идентичность и социальные отношения.

Литература

1. D'Alessandro W., Ford T. W., Yankoski M. I Contain Multitudes: A Typology of Digital Doppelgängers // *The American Journal of Bioethics*. – 2025. – Vol. 25, No. 2. – pp. 132–134.
2. Savin-Baden M. *Rethinking Learning in an Age of Digital Fluency: Is Being Digitally Tethered a New Learning Nexus?* – London: Routledge, 2015. – 198 p.
3. Hurtado J. Exploited in immortality: Techno-Capitalism and Immortality Imaginaries in the Twenty-First Century // *Mortality*. – 2024. – Vol. 29, No. 4. – pp. 903–920.
4. Floridi L. *The Ethics of Artificial Intelligence*. – Oxford: Oxford University Press, 2019. – 232 p.
5. Turkle S. *Alone Together: Why We Expect More from Technology and Less from Each Other*. – New York: Basic Books, 2011. – 360 p.

ГИБРИДНЫЙ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ГЕНЕРАЦИИ СЛОЖНЫХ КРИВОЛИНЕЙНЫХ ФОРМ В ЗАДАЧАХ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

Н.А. Бондарева¹, аспирант

¹ *Институт Прикладной Математики им. М.В.Келдыша РАН, Москва*
nicibond9991@gmail.com

Аннотация. Работа посвящена развитию гибридного методологического подхода к автоматизированному созданию трёхмерных моделей сложных криволинейных форм для задач научной визуализации. В разрабатываемой методике предлагается математический промпт-инжиниринг, включающий в себя формирование конкретизированных запросов к генеративной нейросети с включением явных математических описаний целевой геометрии (параметрических уравнений, аналитических выражений, граничных условий). Нейросеть генерирует не саму 3D-модель, а верифицируемый управляющий скрипт для среды Blender, что обеспечивает детерминированность и воспроизводимость результата. Подход апробирован на объектах различной геометрической сложности: от поверхностей второго порядка до топологически нетривиальных объектов и трёхмерных фракталов. Результаты подтверждают применимость методики к широкому классу криволинейных поверхностей и математических абстракций.

Введение

Технологии искусственного интеллекта развиваются стремительно и уже ощутимо меняют целый ряд профессиональных областей – от архитектурного проектирования до промышленного дизайна и инженерного моделирования [1-3]. Генеративные нейросетевые архитектуры показывают впечатляющие результаты в создании визуальных и геометрических решений, и это, естественно, порождает интерес к их использованию для автоматизации проектных процессов. Особенно перспективным выглядит применение таких технологий для генерации трёхмерных моделей сложной криволинейной геометрии – они востребованы и в научной визуализации, и в архитектурно-строительной практике.

Сложные криволинейные и органические формы – одна из заметных тенденций в современной архитектуре, хотя ещё недавно их реализация упиралась в серьёзные технологические ограничения [4]. Ситуацию изменило развитие аддитивного производства в строительстве, прежде всего строительной 3D-печати [5]. Принтеры, работающие с бетонными смесями и другими материалами, позволяют послойно возводить конструкции практически произвольной геометрии: криволинейные стены, оболочки, фасадные элементы. Но здесь возникает узкое место: для печати нужна цифровая 3D-модель, на основе которой генерируются управляющие траектории печатающего устройства [6]. В этой связи ряд исследователей обращает внимание на Blender – платформу с развитыми средствами параметрического и скриптового моделирования – как на перспективный инструмент подготовки геометрии для аддитивного производства [7, 10].

При всём прогрессе генеративных нейросетей их прямое применение для создания инженерных 3D-моделей наталкивается на хорошо известную проблему «чёрного ящика»: процесс генерации остаётся непрозрачным, результаты трудно валидировать, а целенаправленно корректировать – ещё труднее [8]. Это ограничение становится особенно болезненным там, где предъявляются повышенные требования к геометрической точности, – в научной визуализации сложных пространственных структур или при подготовке моделей для аддитивного производства.

Ранее в статье [9] был предложен и экспериментально проверен гибридный методологический подход, в основе которого лежит совместное использование систем обработки естественного языка и верифицированных инженерных программных комплексов.

Идея состоит в следующем: генеративная нейросеть создаёт не саму 3D-модель, а управляющий скрипт, который затем исполняется в программной среде. Благодаря этому фокус контроля смещается, и вместо проверки готовой модели верифицируются параметры скрипта, что обеспечивает детерминированность и воспроизводимость результата. Вместе с тем апробация ограничилась базовыми геометрическими примитивами, и вопрос о применимости подхода к объектам со сложной криволинейной геометрией остался открытым.

Данная работа продолжает это направление исследований. Основной акцент сделан на разработке методики математического промпт-инжиниринга – формулировании запросов к нейросети с явным математическим описанием целевой геометрии. Такой способ постановки задачи позволяет заметно повысить точность и предсказуемость генерируемых скриптов. Результаты могут быть полезны не только для научной визуализации, но и для смежных задач – в частности, для подготовки цифровых моделей криволинейных архитектурных элементов под аддитивное строительное производство.

Методология

Предложенная ранее методология гибридного подхода к автоматизированному 3D-моделированию [9] основывалась на использовании генеративной нейросети для создания управляющего скрипта, исполняемого в среде Blender. Апробация на базовых примитивах (сфера, куб, конус, зубчатое колесо) подтвердила работоспособность подхода и показала его преимущества перед полностью генеративными методами – прежде всего в части детерминированного контроля над результатом. Вместе с тем, практическая ценность подхода в значительной мере определяется его применимостью к объектам со сложной криволинейной геометрией, генерация которых представляет существенно более трудоёмкую задачу, как для ручного, так и для скриптового моделирования.

В данной работе предлагается развитие указанной методологии, ключевым элементом которого является концепция математического промпт-инжиниринга как формирования текстовых запросов к генеративной нейросети с включением явных математических описаний целевой геометрии. Основная идея состоит в том, что включение в промпт точных математических характеристик, таких как параметрические уравнения поверхностей, аналитические выражения, определяющие геометрию, граничные условия и числовые параметры, существенно сужает пространство возможных интерпретаций запроса нейросетью и, как следствие, повышает корректность генерируемого кода.

Общая алгоритмическая схема процесса сохраняет структуру из [9], но этап формулирования промпта существенно расширен. Уточнённый алгоритм включает следующие этапы: 1) Формулировка задачи и математическое описание целевой геометрии, когда класс целевой поверхности или объекта определяется специалистом, им же формулируется и математическое описание, ставятся граничные условия. 2) Текстовый запрос к нейросети формулируется как задание на генерацию Python-скрипта для среды Blender с указанием конкретного математического описания и набора параметров целевого объекта. При необходимости промпт может быть дополнен графическим материалом – изображением целевой поверхности или её аналога. Нейросеть способна проанализировать такое изображение, идентифицировать соответствующий математический объект и учесть это при генерации кода.

Генеративная нейросеть на основе полученного промпта создаёт исполняемый python-скрипт, использующий API Blender (библиотека bpy) для программного построения заданной геометрии. Благодаря наличию в промпте явного математического описания, нейросеть транслирует аналитические выражения непосредственно в вычислительные конструкции кода, что минимизирует семантические потери при переходе от текстового описания к программной реализации. Сгенерированный скрипт запускается в программной среде Blender, где осуществляется автоматическое построение 3D-модели.

Полученная модель подвергается экспертной оценке специалистом. На текущем этапе исследования валидация включает: а) визуальную проверку соответствия построенной модели ожидаемой форме целевого объекта; б) верификацию корректности математических параметров в сгенерированном коде, соответствия коэффициентов, уравнений и граничных условий заданным в промпте значениям. При выявлении несоответствий осуществляется корректировка промпта, когда специалист формулирует уточняющие указания (например, модификация параметров, изменение разрешения сетки, корректировка области определения), после чего цикл генерации повторяется.

Существенным преимуществом предлагаемого подхода является возможность использования мультимодальных входных данных при формировании промпта. Современные генеративные нейросети, поддерживающие обработку как текстовой, так и визуальной информации, позволяют включать в запрос не только аналитическое описание, но и графические образцы целевой поверхности. В ходе экспериментов данная возможность была верифицирована: при подаче на вход нейросети изображения поверхности гауссова распределения система корректно идентифицировала математический объект и сгенерировала адекватный управляющий скрипт. Подобная гибкость открывает широкие возможности для решения визуализационных задач, в которых специалист может не располагать готовым аналитическим описанием, но иметь визуальный образец или эскиз желаемой формы.

Необходимо подчеркнуть, что в рамках предлагаемой методологии роль специалиста не сводится к пассивному принятию результатов работы нейросети. Напротив, квалификация специалиста является ключевым фактором на нескольких этапах: при формулировании математически корректного промпта, при оценке адекватности сгенерированного кода и при принятии решений о направлении корректировки в итеративном диалоге с нейросетью. Таким образом, предлагаемый подход напротив усиливает экспертизу специалиста, предоставляя инструмент для быстрой программной реализации математически определённых геометрических концепций.

Результаты

Для экспериментальной верификации предложенной методики была сформирована система тестовых случаев, охватывающая объекты различных классов геометрической сложности:

- поверхности второго порядка (параболоид, однополостный гиперболоид), классические аналитически определённые поверхности с хорошо известными параметрическими представлениями;
- многогранники (призма) – объект с прямолинейными рёбрами, включённый для оценки универсальности подхода;
- топологически нетривиальные объекты – лента Мёбиуса – неориентируемая поверхность, представляющая интерес с точки зрения корректности построения топологии полигональной сетки;
- статистические поверхности – гауссиан (поверхность двумерного нормального распределения) – гладкая поверхность, заданная аналитической функцией;
- Оболочка Мандельброта – трёхмерный фрактал, генерация которого требует итеративных вычислений и представляет повышенную алгоритмическую сложность;
- многомерные проекции: проекция четырёхмерного объекта гиперкуб (тессеракт) в трёхмерное пространство, требующая корректной реализации проективных преобразований.

Подобный выбор тестовых объектов позволяет оценить применимость математического промпт-инжиниринга к широкому спектру геометрических задач – от стандартных аналитических поверхностей до объектов, генерация которых требует нетривиальных алгоритмических решений.

Первые эксперименты проводились преимущественно для тел-примитивов, таких как цилиндр, конус, шестиугольная призма, представленная на рисунке. Эти объекты создавались при помощи сгенерированного скрипта по ряду заданных пользователем параметров.

Для дальнейших исследований был выбран ряд криволинейных поверхностей и объектов, которые представляют собой базовые геометрические понятия в 3д представлении. Далее они представлены по возрастающей сложности. Первые эксперименты проводились для класса поверхностей, задаваемых алгебраическими уравнениями второй степени. Одним из первых образцов выбран однополостный гиперболоид – связная незамкнутая поверхность второго порядка, параметры которой задаются по формуле:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1$$

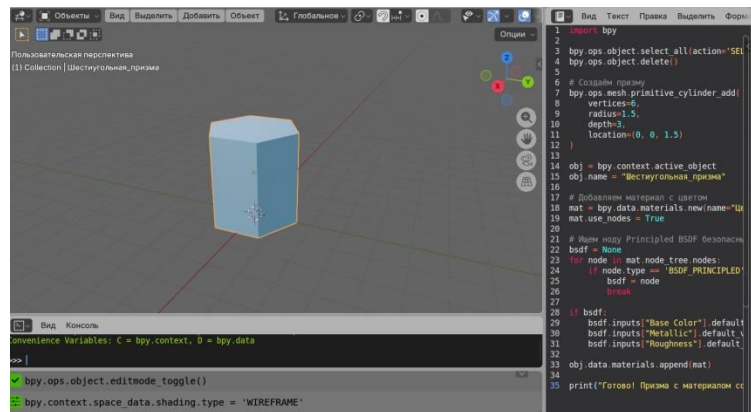


Рис. 1. Визуализация тела-примитива призма

Также в качестве входных параметров помимо коэффициентов a , b и c задавались такие параметры как высота, сегменты по окружности и высоте, позволяющие влиять на сглаживание поверхности.

```
# == Параметры гиперболоида ==
a = 1.0      # радиус по X
b = 1.0      # радиус по Y
c = 1.5      # параметр по Z
height = 3.0 # высота (от -height/2 до +height/2)
segments_u = 64 # сегменты по окружности
segments_v = 64 # сегменты по высоте
```

Рис. 2. Параметры однополостного гиперболоида

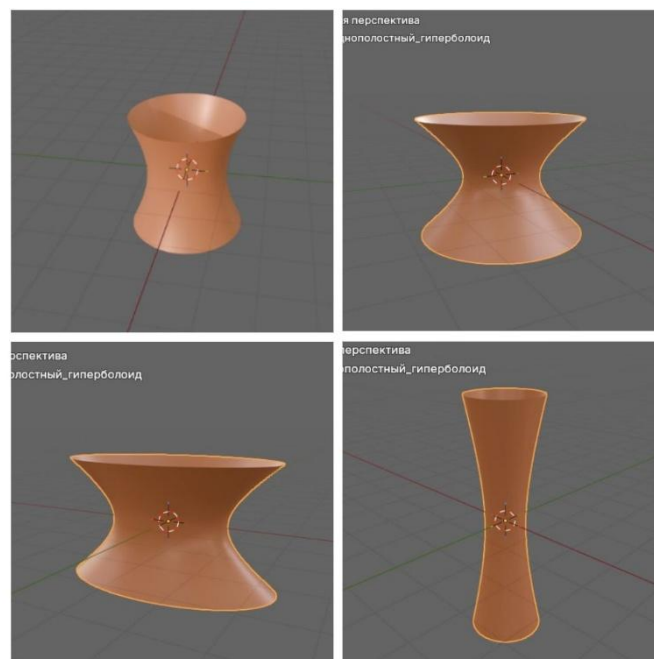


Рис. 3. Визуализация однополостного гиперболоида с различными наборами параметров: 1) $a, b, c = 1, 1, 1.5$, $height = 3$; 2) $a, b, c = 1, 1, 0.8$, $height = 3$; 3) $a, b, c = 1.5, 0.8, 1$, $height = 3$; 4) $a, b, c = 0.5, 0.5, 2$, $height = 6$

С точки зрения интереса к визуализации исследовалась возможность использования данной методики для визуализации сложных криволинейных поверхностей, которые возможны для отражения результатов математического или инженерного проектирования. На следующем рисунке представлена криволинейная поверхность с градиентом, заданная формулой $f(x, y) = \sin(x) \cdot \cos(y)$.

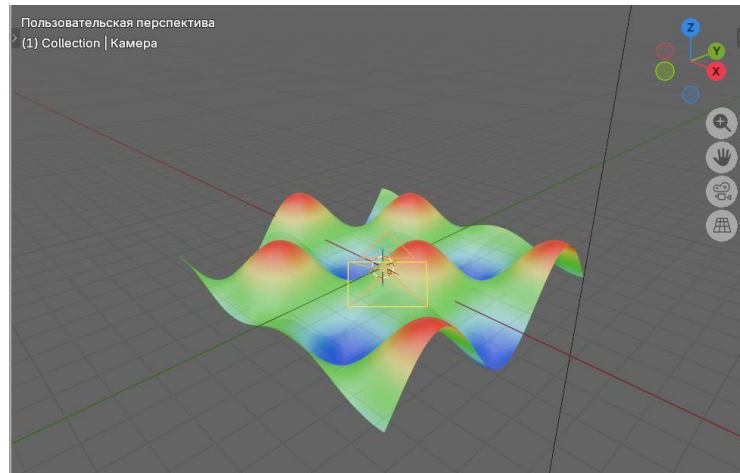


Рис. 4. Визуализация криволинейной поверхности

Следующий образец – это двумерная гауссова поверхность, так называемый график плотности нормального распределения двух переменных, представляющий собой гладкий колоколообразный холм с единственной вершиной в центре. Поверхность определяется формулой и набором параметров (рис. 5), указанных в скрипте. Дополнительно предусмотрены градиентная раскраска и отображение сетки. Также задается градиентная раскраска и сетка.

```
# === Параметры ===
x_min, x_max = -3.5, 3.5
y_min, y_max = -3.5, 3.5
segments_x = 80
segments_y = 80
z_scale = 3.0      # высота пика
sigma = 1.0        # ширина колокола

# === Функция Гаусса ===
def func(x, y):
    return z_scale * math.exp(-(x**2 + y**2) / (2 * sigma**2))

# === Создаём поверхность ===
mesh = bpy.data.meshes.new("Гаусс")
```

Рис. 5. Параметры двумерной гауссовой поверхности

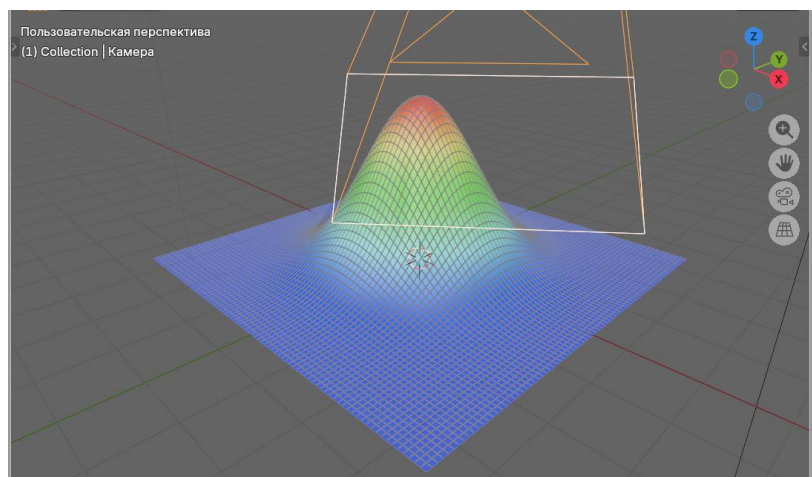


Рис. 6. Визуализация двумерной гауссовой поверхности

Также были смоделированы более сложные объекты, выходящие за рамки стандартной геометрии, наподобие ленты Мёбиуса, гиперкуба, представляющего собой проекцию четырёхмерного куба в трёхмерное пространство, и трёхмерное обобщение фрактального множества Мандельброта – Мандельбульб или Оболочка Мандельброта, демонстрирующий бесконечно сложную самоподобную структуру. В частности, лента Мёбиуса, будучи односторонней неориентируемой поверхностью, описывается параметрическими уравнениями, которые естественным образом переносятся в скрипт.

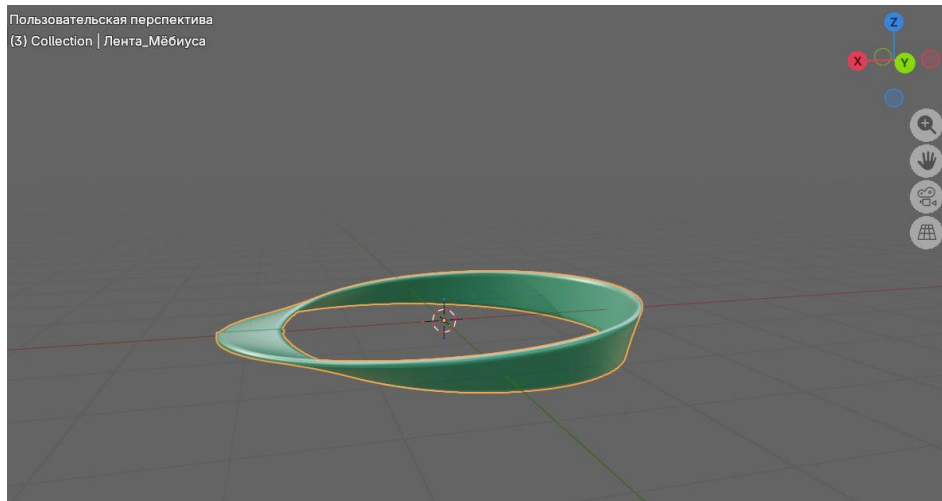


Рис. 7. Визуализация ленты Мёбиуса

Эти объекты наглядно демонстрируют ключевое преимущество скриптового моделирования в способности воплощать в трёхмерной форме то, что существует прежде всего как математическая абстракция. К примеру, оболочку Мандельброта и вовсе невозможно создать средствами ручного моделирования, так как его сложная самоподобная структура порождается исключительно итеративными вычислениями, которые по своей природе требуют программного подхода (рис. 8).

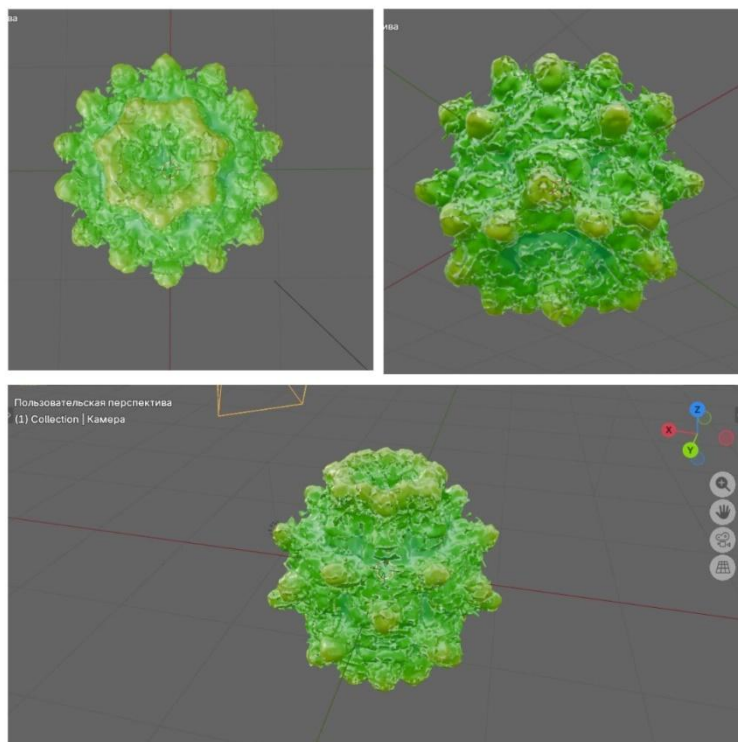


Рис. 8. Визуализация 3D объекта «Оболочка Мандельброта»

```

# === Создаём меш ===
if len(vertices) > 0 and len(triangles) > 0:
    mesh = bpy.data.meshes.new("Mandelbulb")
    obj = bpy.data.objects.new("Мандельбульб", mesh)
    bpy.context.collection.objects.link(obj)

    mesh.from_pydata(vertices, [], triangles)
    mesh.update()

# Пересчёт нормалей
bpy.context.view_layer.objects.active = obj
obj.select_set(True)
bpy.ops.object.mode_set(mode='EDIT')
bpy.ops.mesh.normals_make_consistent(inside=False)
bpy.ops.object.mode_set(mode='OBJECT')

# Сглаживание
bpy.ops.object.shade_smooth()

```

Рис. 9. Выдержка из скрипта, позволяющего создать 3D объект «мандельбульб»

Выше приведена выдержка из сгенерированного python-скрипта, который позволяет создать такой объект, как мандельбульб (рис. 9). Также посредством уточнения промпта в скрипте можно предусмотреть и оптимизировать параметры нагрузки на Blender, позволяя избежать зависания программы и неэффективной траты вычислительных ресурсов.

Заключение

В данной работе предложено развитие гибридного методологического подхода к автоматизированному 3D-моделированию, ранее апробированного на базовых геометрических примитивах, применительно к объектам со сложной криволинейной геометрией. Исследуется концепция математического промпт-инжиниринга, подразумевающего формирование запросов к генеративной нейросети с явным включением аналитических описаний целевых поверхностей, что сужает пространство интерпретаций и повышает корректность генерируемого кода.

Экспериментальная верификация проведена на наборе тестовых объектов возрастающей сложности: от поверхностей второго порядка и статистических поверхностей до топологически нетривиальных объектов, трёхмерных фракталов и проекций многомерных объектов. Результаты подтвердили, что предложенная методика позволяет успешно генерировать корректные управляющие скрипты для построения геометрически сложных объектов, включая те, создание которых средствами ручного моделирования практически невозможно.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности предложенного подхода как для задач научной визуализации сложных пространственных структур, так и для смежных прикладных областей, в частности для подготовки цифровых моделей криволинейных архитектурных элементов под аддитивное строительное производство. Дальнейшие исследования предполагают разработку данного направления, расширение набора тестовых объектов и исследование возможностей автоматизации этапа верификации.

Литература

1. J. Ho, A. Jain, P. Abbeel, Denoising Diffusion Probabilistic Models, 2020, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.11239> (accessed 29.03.2026).
2. C. Meng, Y. He, Y. Song, J. Song, J. Wu, J. Zhu, S. Ermon, SDEdit : Guided Image Synthesis and Editing with Stochastic Differential Equations, 2022, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2108.01073> (accessed 29.03.2026)
3. Radford A., Jong WK, Hallacy C., Ramesh A., Goh G., Agarwal S., Sastry G., Askell A., Mishkin P., Clark J., Krueger G., Sutskever I. 2021. Learning Transferable Visual Models From Natural Language Supervision. arXiv preprint arXiv:2103.00020 [cs.CV]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103> (accessed 29.03.2026)
4. Oxman, R. Thinking difference: Theories and models of parametric design thinking. // Design Studies, – 2017 – 52, 4–39.
5. Buswell, R.A., Leal de Silva, W.R., Jones, S.Z., Dirrenberger, J. (2018). 3D printing using concrete

extrusion: A roadmap for research. *Cement and Concrete Research*, 112, 37–49.

6. Forcael, E., Medina, M., Opazo-Vega, A., Moreno, F., & Pincheira, G. Additive manufacturing in the construction industry // *Automation in Construction*. – 2025. – Т. 169. – С. 105888.

7. Caetano I., Santos L., Leitão A. Computational design in architecture: Defining parametric, generative, and algorithmic design // *Frontiers of Architectural Research*. – 2020. – Т. 9. – №. 2. – С. 287-300.

8. Bondareva N.A. Graphic neural networks and image verification problems // *Proceedings of the 33rd International Conference on Computer Graphics and Machine Vision GraphiCon 2023*, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, September 19-21, 2023, pp . 317-327, DOI : 10.20948/graphicon - 2023-317-327.

9. Н.А. Бондарева, А.Е. Бондарев, С.В. Андреев, И.Г. Рыжова. Разработка методологии применения генеративных нейросетей при создании 3d моделей // *Научная визуализация* – 2025 – 17.3: – 25-34, DOI: 10.26583/sv.17.3.03.

10. Blender Foundation. Blender 5.1 Python API Documentation. – URL: <https://docs.blender.org/api/current/> (дата обращения: 20.03.2026).

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПОДГОТОВКЕ АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ КАДРОВ

Е.М. Волкова, доцент, канд. арх.

*Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет,
Нижний Новгород
skynn@mail.ru*

Аннотация. Статья посвящена анализу применения отечественных информационных технологий (NanoCAD, Renga) в подготовке архитектурно-строительных кадров, готовых к принятию эффективных решений на этапах жизненного цикла объектов капитального строительства, сохранения культурного наследия страны. Актуальная задача обучения архитектурно-строительных кадров: получение навыков использования современных информационных технологий, как основы их профессионализма. В ННГАСУ с 2018 года внедрено BIM-моделирование в учебный процесс, создана система непрерывного использования российских цифровых продуктов во время обучения, что делает выпускников конкурентноспособными на рынке труда.

Введение

Россия опережает многие страны в развитии цифровых технологий архитектурно-строительной деятельности [1], к 2030 году планируется увеличить их применение до 36% с 22% в 2018 г. Переход к новым методам ведения проектирования на основе BIM-технологий (Building Information Modeling) формально стал важным показателем в официальной оценке эффективности работы строительной отрасли в целом и архитектуры, в частности [2].

Сегодня требования к уровню компетенций архитекторов, инженеров-строителей предполагают профессиональное владение методами компьютерной геометрии, графики, создания информационных моделей зданий, что закладывается во время обучения в вузе [3]. Таким образом, данное исследование актуально, поскольку затрагивает вопросы подготовки архитектурно-строительных кадров в области информационных технологий на основе опыта Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета (ННГАСУ).

Материалы и методы

Данное исследование основывается на материалах преподавательской деятельности автора статьи в Нижегородском государственном архитектурно-строительном университете, где 2018 - 2022 годы студенты специальности «Строительство уникальных зданий» изучали BIM-технологии Revit, с 2019 года – отечественные BIM -продукты Renga и NanoCAD. С 2023/24 учебного года в ННГАСУ массово все студенты строительных специальностей на 1 курсе получают навыки по инженерной графике с использованием программы NanoCAD, на 2 курсе в рамках дисциплины «Информационное моделирование в строительстве» два семестра создают цифровые двойники зданий и их сетей в Renga.

Методы исследования: системный подход к анализу подготовки архитектурно-строительных кадров в сфере информационных технологий в ННГАСУ.

Результаты исследования

Согласно законам РФ, с 01.01.2022 все объекты капитального строительства, финансируемые государством, проектируются и проходят экспертизу проектной документации с BIM-моделями, с 01.07.2024 – все жилищное строительство, с 01.01.2025 – девелоперские проекты с долевым участием. С 2019 года в каждом регионе страны работают Государственные информационные системы обеспечения градостроительной деятельности (ГИСОГД) с единой цифровой картой территорий, «3Д-городами»,

сформировано единое информационное пространство (ЕИП) федерального уровня, состоящее из региональных, муниципальных систем, среды общих данных проектных, подрядных, эксплуатирующих организаций, поставщиков.

В среде общих данных архитектор, конструктор, инженер-проектировщик работают совместно над одной и той же BIM-моделью, отслеживая изменения, что помогает избежать ошибок, сократить время на разработку и согласование решений. Организовать среду общих данных можно с помощью российских систем Pilot-BIM, Renga Collaboration Server и других, обмен информацией осуществляется с помощью формата IFC, с CAD-системами посредством чертежей в формате DWG/DXF [4].

Российский рынок программных продуктов сейчас активно развивается. Однако все разделы проектной документации сегодня можно выполнить только в Renga, пока она является основным продуктом, полностью удовлетворяющим требования строительной отрасли и подготовки кадров для нее. Ряд задач могут решить российские программы NanoCAD и Model Studio CS, работающая на базе платформы NanoCAD.

Требования к BIM-моделям, форматам обмена данными представлены в стандартах Единой системы информационного моделирования (ЕСИМ), например, в ГОСТ Р 10.00.00.00-2023 «ЕСИМ. Основные положения» и других. Благодаря наличию информационной модели упрощаются расчеты конструкций, сетей, теплотехники, проверки объектов на соответствие заданным характеристикам, требованиям технических регламентов, стандартов для их безопасного использования [5]. Архитекторы для первичной конструктивной оптимизации формы используют цифровое моделирование объекта для внедрения заданных правил и эволюционных алгоритмов [6]. Цифровые двойники помогают прогнозировать развитие архитектурных объектов, улучшать их качество, повышать рентабельность вложений для участников инвестиционно-строительного процесса.

Цифровые технологии также эффективны в деле сохранения объектов культурного наследия. Лазерные дальномеры и 3Д-сканеры позволяют быстро получать данные для создания точной цифровой модели объекта, их применение до 40% уменьшает затраты на предпроектные работы, повышает точность измерений, ускоряет создание цифрового двойника.

Благодаря постоянному повышению квалификации по изучению отечественных BIM-технологий преподавателями ННГАСУ с различных кафедр, удалось создать в вузе систему непрерывного использования этих продуктов во время обучения студентов. Таким образом, выпускники ННГАСУ по уровню подготовки соответствуют сегодняшним требованиям строительной отрасли, являются конкурентноспособными на рынке труда. Полученные навыки по BIM-моделированию позволяют им на практике решать профессиональные задачи, принимать эффективные решения на всех этапах жизненного цикла объектов капитального строительства, сохранения культурного наследия страны.

Выводы

1. Россия опережает многие страны в развитии цифровых технологий архитектурно-строительной деятельности, здесь с 2019 года работают региональные Государственные информационные системы обеспечения градостроительной деятельности (ГИСОГД), разработаны стандарты Единой системы информационного моделирования (ЕСИМ), развиваются такие продукты, как Renga, NanoCAD, сегодня закрывающие потребности отрасли в BIM-моделировании.
2. Актуальная задача обучения архитектурно-строительных кадров: получение навыков использования современных информационных технологий BIM-моделирования, как основы их профессионализма.
3. В ННГАСУ с 2018 года внедрено BIM-моделирование в учебный процесс, создана система непрерывного использования российских цифровых продуктов (NanoCAD, Renga) во время обучения, что делает выпускников конкурентноспособными на рынке труда.

4. Цифровые двойники помогают в деле сохранения объектов культурного наследия, прогнозирования развития архитектуры зданий, улучшения их качества, повышения рентабельности вложений для участников инвестиционно-строительного процесса.

Литература

1. Бутенко, А.И. Развитие цифровых технологий в строительной отрасли России / А. И. Бутенко // Вестник науки, 2023. – Т. 4, № 11(68). – С. 644–650.
2. Дубынин, Н. В. Цифровая архитектура / Н. В. Дубынин [и др.] // Academia. Архитектура и строительство, 2022. – № 1. – С. 19–28.
3. Ротков, С. И. Концепция реализации BIM в учебном процессе на основе профиля ПГС / С. И. Ротков, Е. В. Конопацкий, М. В. Лагунова // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2023. – № 3. – С. 9-21
4. Волкова, Е. М. Цифровые технологии в архитектурно-строительной деятельности /Е. М. Волкова // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Архитектура и градостроительство: сборник статей 82-й всероссийской научно-технической конференции / Самарский государственный технический университет. – Самара, 2025. – С. 60-66.
5. Волкова, Е.М. Информационное и программное обеспечение архитектурно-строительной деятельности /Е. М. Волкова / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – учеб. пособие. – Нижний Новгород: ННГАСУ, 2020. – 81 с.
6. Салех, М.С. Внедрение цифровых методов на различных этапах архитектурного проектирования / М. С. Салех // Architecture and Modern Information Technologies, 2021. – №1 (54). – С. 268–278.

ОСОБЕННОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ СИНТЕЗА РУССКОЙ РЕЧИ В TTS МОДЕЛЯХ

Л.Д. Высоцкий, студент бакалавриата

Д.А. Тараканов, студент бакалавриата

*Нижегородский филиал национального исследовательского университета «Высшая Школа
Экономики», Нижний Новгород*
leonidvysotskiy52@gmail.com, datarakanov@edu.hse.ru

Аннотация. В работе рассматриваются особенности генерации русскоязычной речи в современных нейросетевых моделях генерации речи. Проведён анализ качества аудио, полученного с использованием ряда TTS и voice cloning моделей, на основе специально сформированного тестового набора. Выявлены типовые ошибки, связанные с постановкой ударения, интонацией и обработкой сложных языковых конструкций. Результаты дополнены пользовательской оценкой восприятия синтетической речи.

Введение

Нейросетевые технологии синтеза речи в последние годы демонстрируют значительный прогресс и активно внедряются в различные цифровые продукты [1]. Системы Text-to-Speech используются в голосовых помощниках, системах навигации, образовательных сервисах и автоматической озвучке контента. Несмотря на высокий уровень развития данных технологий, качество генерации речи существенно зависит от языка.

Русский язык представляет собой сложную систему с точки зрения автоматической обработки. Подвижное ударение, богатая морфология, наличие омографов и сложная интонационная структура создают дополнительные трудности для моделей синтеза речи. В результате даже современные нейросетевые решения демонстрируют нестабильные результаты при генерации русскоязычного аудио. Целью данной работы является исследование ограничений, возникающих при синтезе русской речи, а также выявление наиболее частых типов ошибок в современных TTS моделях.

Материалы и методы

Для проведения исследования был сформирован тестовый набор текстов, охватывающий различные аспекты речевой сложности. В него были включены:

- числительные (включая даты, большие числа и составные формы);
- аббревиатуры различных типов;
- омографы, требующие контекстной интерпретации;
- длинные предложения со сложной синтаксической структурой;
- фразы с различной интонационной и эмоциональной окраской.

Данный набор позволил оценить способность моделей корректно воспроизводить ключевые элементы русской речи.

Генерация аудио выполнялась с использованием современных моделей синтеза речи и клонирования голоса, построенных на архитектурах глубокого обучения [2]. Для обеспечения сопоставимости результатов использовался единый корпус текстов. Полученные аудиофрагменты сравнивались с эталонными записями, выполненными человеком.

Оценка качества проводилась по следующим параметрам:

- корректность ударения;
- интонационная структура;

- естественность пауз;
- разборчивость речи;
- стабильность тембра (для задач клонирования).

Дополнительно был проведён пользовательский опрос. Респондентам предлагалось прослушать сгенерированные аудиофрагменты и оценить их по критериям естественности и разборчивости.

Результаты исследования

Проведённый анализ показал, что при синтезе русскоязычной речи наиболее часто возникают ошибки, связанные с фонетическими и просодическими особенностями языка. Наиболее значимыми являются ошибки постановки ударения, которые в ряде случаев приводят к изменению смысла слов. Также выявлены нарушения интонационной структуры: модели некорректно расставляют логические акценты и паузы, что снижает естественность звучания. При увеличении длины высказывания наблюдается ухудшение разборчивости и появление дополнительных артефактов.

Сложности возникают при обработке числительных и аббревиатур. В этих случаях модели демонстрируют нестабильность: возможны ошибки в интерпретации и произношении. В задачах клонирования голоса дополнительно фиксируется снижение устойчивости тембра. Для количественной оценки результатов был выполнен анализ частоты возникновения различных типов ошибок.

Таблица 1 – Частота типовых ошибок при синтезе русскоязычной речи

Тип ошибки	Доля моделей с ошибкой, %
Ошибки постановки ударения	72%
Некорректная интонация	59%
Неестественные паузы	25%
Ошибки при чтении числительных	67%
Ошибки при чтении аббревиатур	76%
Снижение разборчивости длинных фраз	17%

Результаты пользовательского опроса показали, что русскоязычные аудиофрагменты в среднем получают более низкие оценки по сравнению с англоязычными. Наибольшее влияние на восприятие оказывают ошибки интонации и ударения, тогда как незначительные тембральные искажения воспринимаются менее критично.

Заключение

Проведённое исследование позволяет сделать вывод о том, что современные TTS модели испытывают устойчивые трудности при генерации русскоязычной речи. Основные ограничения связаны с недостаточной точностью воспроизведения фонетических и просодических характеристик языка. Полученные результаты указывают на необходимость дальнейшей адаптации аудиогенеративных моделей под русскоязычные данные и могут быть использованы при разработке более качественных решений в области синтеза речи.

Литература

1. Shen J., Pang R., Weiss R. et al. Natural TTS synthesis by conditioning WaveNet on Mel spectrogram predictions // IEEE ICASSP. 2018.
2. Pratap V., Tjandra A., Shi B. et al. Scaling Speech Technology to 1,000+ Languages // arXiv. 2023.

ИНТЕГРАЦИЯ MLOPS В LOGINOM ДЛЯ АНАЛИТИКИ ДАННЫХ МАРКЕТПЛЕЙСОВ

Н.Ю. Прокопенко, доцент, канд. физ.-мат. наук

Я.Д. Гоголева, бакалавр

*Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет,
Нижний Новгород
yanagogoleva.04@mail.ru*

Аннотация. В статье рассматривается интеграция MLOps-практик в low-code платформу Loginom на примере информационно-аналитической системы прогнозирования и анализа заказов на маркетплейсах. Описан опыт применения фреймворка ClearML для отслеживания экспериментов, управления версиями данных и моделей в условиях визуальной разработки. Представлены два типа экспериментов: ETL-процесс с RFM-анализом и ML-эксперимент с построением дерева решений. Показаны возможности и ограничения интеграции MLOps-инструментов с платформами класса low-code.

Введение

Современная аналитика маркетплейсов требует постоянного экспериментирования с данными и моделями машинного обучения. Аналитики сталкиваются с типичной проблемой: после десятков запусков сценариев обработки невозможно вспомнить, какие именно параметры и версии данных использовались для получения лучшего результата. Отсутствие систематического отслеживания экспериментов приводит к потере времени на повторение уже выполненных расчётов и невозможности воспроизвести успешные результаты.

MLOps (Machine Learning Operations) предлагает решение этой проблемы через автоматизацию отслеживания экспериментов, хранения данных и моделей. Однако большинство MLOps-инструментов ориентированы на работу с языками программирования, что создаёт сложности для аналитиков, работающих в low-code средах [1].

Цель данной работы – продемонстрировать возможность интеграции MLOps-практик в low-code платформу Loginom на примере разработки системы прогнозирования для маркетплейсов с использованием фреймворка ClearML.

Материалы и методы исследования

Разработка информационно-аналитической системы выполнялась в платформе Loginom версии 7.2 с использованием библиотеки компонентов Loginom Python Kits 3.2.2. Для интеграции MLOps-практик применялся фреймворк ClearML в облачной версии (app.clear.ml).

При подготовке текста статьи для литературной обработки и структурирования описания технической реализации использовались инструменты искусственного интеллекта (ChatGPT). Все результаты экспериментов, метрики моделей и технические решения были получены самостоятельно.

Основы MLOps и выбор инструментов

Процесс внедрения MLOps можно разделить на три уровня зрелости:

Уровень 1: нет автоматизации. Эксперименты выполняются вручную, данные разрознены, версии отслеживаются в лучшем случае через имена файлов. Результаты экспериментов теряются после перезаписи файлов.

Уровень 2: частичная автоматизация. Внедряются системы контроля версий кода, централизованные репозитории данных. Создаются конвейеры CI/CD для автоматической

сборки и тестирования, однако мониторинг остаётся поверхностным, а масштабируемость ограничена.

Уровень 3: значительная автоматизация. Применяются полноценные MLOps-фреймворки, автоматизирующие весь жизненный цикл: от подготовки данных до развёртывания и мониторинга моделей. Обеспечивается максимальная эффективность и прозрачность процессов.

Для low-code платформ достижение даже второго уровня является значительным прогрессом, так как традиционные инструменты контроля версий (например, Git) требуют понимания концепций ветвления и слияния, что может быть сложным для аналитиков без опыта программирования.

Выбор фреймворка ClearML

Для интеграции с Loginom был выбран фреймворк ClearML на основании следующих критериев [2]:

- 1) Наличие облачной версии – возможность начать работу без развёртывания собственной инфраструктуры;
- 2) Работа в локальной сети – поддержка on-premise развёртывания для организаций с требованиями к безопасности данных;
- 3) Поддержка сторонних файловых хранилищ – интеграция с различными типами хранилищ данных;
- 4) Богатый REST API – возможность автоматизации и интеграции с внешними системами;
- 5) Open source – отсутствие рисков недоступности зарубежного ПО.

Сравнительный анализ популярных MLOps-фреймворков (табл. 1) показывает, что ClearML предоставляет наиболее полный набор функций для работы в условиях российских реалий.

Таблица 1 – Сравнение MLOps-фреймворков

Опция	MLFlow	ClearML	TensorBoard	W&B	Verta AI
Локальное хранение	+	+	+	+	+
Менеджер экспериментов	+	+	+	+	+
Менеджер датасетов	-	+	-	-	-
Единая платформа	-	+	-	-	-

Архитектура разработанной системы

Информационно-аналитическая система прогнозирования заказов на маркетплейсах реализована в виде набора пакетов Loginom, интегрированных с ClearML через библиотеку компонентов Loginom Python Kits версии 3.2.2.

Система состоит из двух основных компонентов:

- 1) ETL-эксперимент (data-prep.lgp) – процесс извлечения, преобразования и загрузки данных с применением RFM-анализа для сегментации клиентов;
- 2) ML-эксперимент (ml-experiment.lgp) – построение предсказательной модели на основе дерева решений для прогнозирования объёма заказов.

Интеграция с ClearML осуществляется через специализированные компоненты библиотеки, которые автоматически отправляют метаданные экспериментов через REST API фреймворка. Фактические данные хранятся в файловой системе проекта, а ClearML отслеживает их версии и связи между экспериментами.

Реализация ETL-эксперимента

ETL-эксперимент реализует процесс подготовки данных для последующего анализа с применением RFM-анализа – метода сегментации клиентов на основе трёх показателей: Recency (давность покупки), Frequency (частота покупок), Monetary (денежная ценность) [3].

Сценарий data-prep.lgp состоит из следующих модулей:

- 1) Настройка подключения – установка параметров авторизации в ClearML через компонент Environment Variables;
- 2) Импорт сырых данных – загрузка исходных файлов из папки raw-data проекта;
- 3) Сохранение в датасет – выгрузка данных в ClearML с созданием versionированного снимка.

В эксперимент записываются следующие гиперпараметры: количество и наименование узлов процесса обработки; структура каждого датасета (список полей, типы данных); статистика распределения значений (минимум, максимум, количество уникальных значений, наличие пропусков); время выполнения каждого этапа. Метрикой эксперимента является общее время выполнения сценария, что позволяет сравнивать производительность различных вариантов обработки.

Для наглядного примера можно взять раздел CONFIGURATION (рис. 1), где отражены свойства пакета Loginom и все гиперпараметры, отправленные из ETL-процесса. Внутри проекта содержится эксперимент, в котором присутствуют все записанные данные.

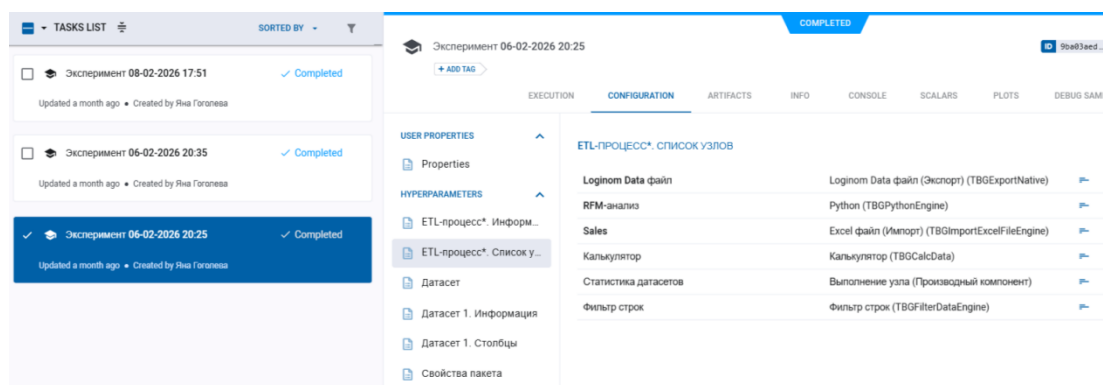


Рис. 1. Раздел конфигурации в ClearML

Реализация ML-эксперимента

На основе подготовленных данных реализован ML-эксперимент, целью которого является построение модели для прогнозирования объёма заказов.

Сценарий файла ml-experiment.lgp включает:

- 1) Получение датасета – загрузка актуальной версии данных из ClearML с проверкой по хэш-суммам;
- 2) Сценарий эксперимента – подмодель, содержащая: фильтрацию данных, группировку показателей, построение дерева решений с помощью Python-узла, расчёт метрик качества модели, экспорт результатов.
- 3) Запись в эксперимент – автоматическая отправка гиперпараметров, метрик и артефактов в ClearML.

Для прогнозирования применяется алгоритм дерева решений, реализованный через компонент Python-скрипт библиотеки Loginom Python Kits [4]. Модель обучается на данных о заказах. В ClearML передается информация о предсказательной способности модели. В случае каких-либо изменений в коде узла Python можно будет отследить, как это повлияло на предсказательную способность, сравнить с предыдущей версией эксперимента (рис. 2).

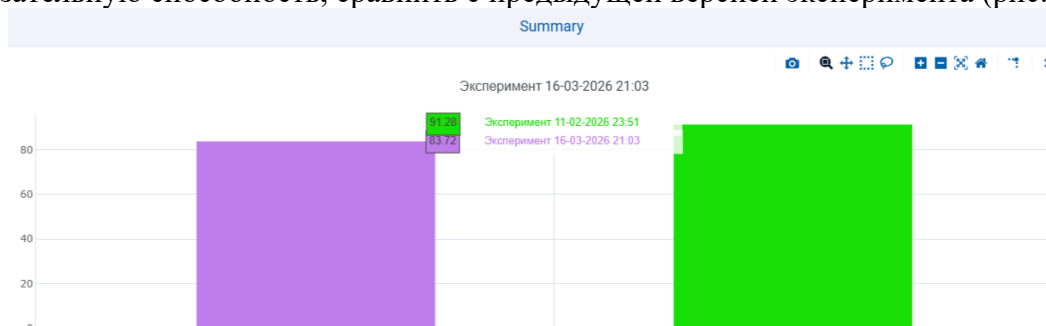


Рис. 2. Сравнение предсказательной способности модели

Результаты интеграции

Интеграция ClearML с Loginom обеспечила следующие возможности:

- 1) Автоматическое версионирование данных. Каждое изменение в исходных данных фиксируется как новая версия датасета с автоматическим вычислением хэша и сохранением метаданных.
- 2) Воспроизводимость экспериментов. Возможность вернуться к любому предыдущему запуску сценария с точным набором данных, параметров и кода.
- 3) Сравнение экспериментов. Визуальное сопоставление метрик различных запусков для выбора оптимальной конфигурации.
- 4) Отслеживание происхождения данных (Data Lineage). Прозрачная связь между исходными данными, промежуточными результатами и финальными моделями [5].
- 5) Хранение артефактов. Централизованное хранилище всех файлов, связанных с экспериментами, с возможностью скачивания любой версии.

В процессе работы были выявлены следующие ограничения текущей реализации:

- 1) Отсутствие визуализации в ClearML. Таблицы и графики, созданные в Loginom, не передаются в ClearML автоматически, только при дополнительной настройке.
- 2) Отображаются только скалярные метрики и структура данных в текстовом виде.
- 3) Ограниченная поддержка сложных артефактов. Специфичные форматы Loginom (lgd, lgp) хранятся как бинарные файлы без возможности предпросмотра в веб-интерфейсе ClearML.
- 4) Ручная настройка параметров. Для каждого нового проекта требуется заполнение переменных окружения с ключами доступа ClearML.
- 5) Отсутствие автоматического сравнения моделей. Функционал Model Registry в ClearML используется только для хранения, без автоматической оценки ухудшения качества.

Эти ограничения являются следствием различий в архитектуре low-code платформ и классических MLOps-инструментов.

Заключение

В работе продемонстрирована успешная интеграция MLOps-практик в low-code платформу Loginom с использованием фреймворка ClearML. Разработанная информационно-аналитическая система прогнозирования заказов на маркетплейсах реализует автоматическое отслеживание экспериментов, хранение данных и управление артефактами без необходимости написания кода на языках программирования.

Достигнутый уровень зрелости MLOps (частичная автоматизация) является значительным прогрессом для аналитиков, работающих в визуальных средах разработки.

Направления дальнейшего развития включают в себя автоматизацию передачи визуализаций из Loginom в ClearML через конвертацию в стандартные форматы, реализацию автоматического сравнения моделей с уведомлениями об ухудшении качества, а также разработку шаблонов для типовых аналитических задач с преднастроенной интеграцией MLOps.

Литература

1. АНО «Цифровая экономика <https://files.data-economy.ru> > AI_Future_2025 MLOps URL: <https://bigdataschool.ru/wiki/mlops/> (дата обращения: 15.03.2026).
2. ClearML Documentation. URL: <https://clear.ml/docs/latest/docs/> (дата обращения: 15.03.2026).
3. Школа Финансовой аналитики проектов, бизнеса URL: <https://finzz.ru/rfm-analiz-dlya-marketplejsa-segmentaciya-klientov-po-recency-frequency-monetary.html> (дата обращения: 15.03.2026).
4. Loginom. Система сегментации клиентской базы. URL: <https://marketplace.loginom.ru/solutions/lcs/> (дата обращения: 16.03.2026).
5. Управление моделями машинного обучения (ML-model management) URL: <https://wiki.loginom.ru/articles/model-management.html> (дата обращения: 16.03.2026).

СЖАТИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ: ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Д.И. Кислицын, доцент, канд. техн. наук

И.И. Карпов, аспирант

*Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет,
Нижний Новгород
Kii137@yandex.ru*

Аннотация. В статье представлен всесторонний обзор методов сжатия как растровой, так и векторной графики. Описаны классические алгоритмы без потерь, легкий формат, методы с потерями и техники оптимизации векторных файлов. На базе экспериментальных данных, полученных для трех типов изображений, сравниваются коэффициенты сжатия, скорость кодирования и визуальное качество. Предлагается перспективный интерполяционный гибрид. Рассматривается роль искусственного интеллекта в автоматизации разбиения и выборе параметров.

Введение

Современные цифровые технологии генерируют огромные объемы графической информации, и эффективность ее хранения и передачи становится критически важной. Растровые изображения продолжают доминировать в веб-сайтах, мобильных приложениях и мультимедиа, однако векторные форматы (SVG, EPS, PDF, AI) становятся все более востребованными благодаря масштабируемости, гибкости редактирования и точности воспроизведения. Оба типа данных требуют специализированных методов сжатия, которые позволяют снизить нагрузку на сеть и устройства, сохраняя при этом визуальное качество.

С ростом качества и разрешения цифровой графики объемы передаваемых и хранимых изображений стремительно увеличиваются. Растровые форматы (PNG, JPEG, WebP) остаются доминирующим способом доставки фотографий и текстур, однако их размер растет пропорционально количеству пикселей, что создает нагрузку на сеть и устройства. Векторные форматы (SVG, EPS, PDF, AI) позволяют масштабировать изображения без потери резкости, но размер файла зависит от сложности геометрии и часто оказывается неудобным для фотоматериалов [1]. Чтобы решить эту проблему, исследуются как традиционные алгоритмы сжатия без и с потерями, так и новые подходы, основанные на легких кодировках, гибридных интерполяционных схемах и методах искусственного интеллекта. В статье суммируются основные методы, приводятся результаты экспериментального сравнения и предлагается перспектива развития гибридного «симбиоза» растровой и векторной информации.

Материалы и методы

Классические алгоритмы без потерь. Одним из фундаментальных способов уменьшения размера файла без потери визуального качества являются энтропийные кодеры. Алгоритм Хаффмана строит бинарные коды переменной длины, обратные частоте появления символов в потоке данных. После анализа частотности создается бинарное дерево, в котором часто встречающиеся символы получают короткие коды, а редкие – длинные. Такой подход минимизирует среднее число бит на символ и широко используется в PNG, GIF и в текстовых потоках SVG.

Словарный метод LZ77 (Lempel–Ziv, 1977) дополняет Хаффман, устраняя избыточность за счет поиска повторяющихся последовательностей в скользящем окне. Окно делится на область поиска (ранее обработанные данные) и буфер просмотра (текущие данные). При совпадении вместо повторения последовательности записывается тройка

параметров: смещение, длина и следующий символ. После этого LZ77 часто комбинируется с кодированием Хаффмана, образуя ядро алгоритма Deflate, применяемого в PNG [2].

Перед передачей данных в PNG каждый ряд байтов может быть обработан одним из пяти фильтров (табл. 1).

Таблица 1 – Фильтрация ряда пикселей перед сжатием современного алгоритма Deflate

Название метода	Описание
None	Без фильтрации
Sub	Разница текущего пикселя и предыдущего в той же строке
Up	Разница текущего пикселя и пикселя из предыдущей строки
Average	Среднее значение Sub и Up
Paeth	Выбор из трех соседних пикселей (левый, верхний, верхний-левый) наиболее близкого к предсказанному значению

Выбор фильтра влияет на степень редукции данных: хорошее предсказание приводит к небольшим остаткам, которые Deflate затем эффективно кодирует.

Легкий без-потерь формат QOI: в 2021 году Доминик Шаблевски представил QOI (Quite OK Image). Формат состоит из четырех основных техник: регистровый кэш из 64 слотов (для часто повторяющихся цветов), дифференциальное кодирование небольших изменений между соседними пикселями, RLE для длинных последовательностей одинаковых пикселей и прямое кодирование для редких случаев. Благодаря этой простоте QOI кодирует в 20 раз быстрее, а декодирует в 3 раза быстрее, чем традиционный PNG, однако уровень сжатия уходит позади Deflate на изображениях с высокой детализацией [3].

Сжатие с потерями: для получения очень высоких коэффициентов сжатия применяют методы, удаляющие информацию, считающуюся мало значимой для человеческого восприятия. Наиболее известный JPEG, основанный на блочном 8 на 8 пиксельном Дискретном Косинусном Преобразовании (DCT). После преобразования коэффициенты делятся на элементы матрицы квантования; высокочастотные коэффициенты сильно упрощаются, а большинство из них после округления становятся нулями. Оставшиеся данные энтропийно кодируются (обычно Хаффманом). JPEG также использует преобразование из RGB в YCbCr, субдискретизацию хрома (например, 4:2:0), что часто приводит к артефактам «блокинга».

Вейвлет-преобразования: в отличие от фиксированных 8 на 8 блоков DCT, вейвлет-анализ разлагает изображение на несколько масштабных уровней, используя пару фильтров: низкочастотный (LL) и высокочастотный (LH, HL, HH). После этого получаются четыре подполосы, в многократном рекурсивном применении LL формируются более крупные уровни. Квантование большинства высокочастотных коэффициентов приводит к нулевым значениям, что позволяет достичь степени сжатия, сравнимой с JPEG, но без характерных блоковых артефактов [4].

Векторная графика и ее оптимизация: векторные форматы (SVG, EPS, PDF, AI) описывают изображение через набор команд (path, line, curve), стили и атрибуты, а не через отдельные пиксели. Это обеспечивает масштабируемость без потери резкости, однако размер файла растет с увеличением количества контрольных точек, сложностью кривых и дублированием стилей.

Для уменьшения объема применяются четыре группы техник (табл. 2).

Эти приемы позволяют сократить количество строк SVG с десятков тысяч до нескольких сотен, а координаты округлить до 0,01 px без заметного ухудшения качества [5].

Таблица 2 – Методы сжатия векторной графики

Название метода	Описание
Псевдо-битовое кодирование	Хаффман, арифметическое кодирование текстовых потоков SVG
Упрощение геометрии	Алгоритмы Ramer-Douglas-Peucker (RDP) и Visvalingam-Whyatt удаляют избыточные контрольные точки, сохраняют форму
Группировка повторяющихся элементов	Хеш-таблицы, LZ77/Deflate устраняют дублирование стилей, паттернов; SVG-конструкции <use>/<symbol> позволяют объявлять один объект и многократно использовать его.
Сжатие вложенных растров	GZIP, Brotli применяются к base64-закодированным PNG/JPEG, встроенным в SVG

Результаты исследования

Экспериментальная оценка проводилась на трех тестовых изображениях (1920 × 1080 px, 6 220 800 байт): однородный черный фон, типичный пейзаж и случайный шум (рис. 1).



Рис. 1. Используемые изображения однородного фона, пейзажа и случайного шума для экспериментов

Результаты сравнения методов сжатия приведены в таблице 3 ниже.

Таблица 3 – Результаты сравнения методов сжатия растровых изображений

Название метода	Однородный фон, байт	Пейзаж, байт	Случайный шум, байт	Коэффициент сжатия
Deflate (PNG)	6 063	4 693 533	6 130 816	1026 / 1,33 / 1,01
QOI	33 469	3 496 744	7 963 071	185,9 / 1,78 / 0,78
JPEG (DCT)	33 267	424 720	905 178	187 / 14,65 / 6,87
Вейвлет	33 267	494 483	1 149 436	187 / 12,58 / 5,41

Далее подобный эксперимент был проведен с векторной графикой. Для простого SVG-рисунка размер оставался почти неизменным при масштабировании x1, x2 и x4 ($\approx 0,6$ KB), в то время как PNG и JPEG росли линейно (от 4,3 KB до 27,8 KB). Полная векторизация фотоматериалов показала резкое увеличение: пейзаж JPEG (73 KB) преобразовался в цветной SVG размером 2009 KB, а геодезический план PNG (31,7 KB) в черно-белый SVG (116,2 KB), что подтверждает нецелесообразность полной векторизации типичных фотографий.

В качестве перспективного направления предлагается интерполяционный гибридный метод, вдохновленный идеей вейвлет-разбиения, но реализуемый без прямого вейвлет-анализа, где суть заключается в том, что изображение делится на адаптивные фрагменты по порогу энергии (градиент, локальная дисперсия), далее эти части кодируются набором функций. Внутри контура хранится информация о цвете, а к ней привязываются параметры интерполяционной функции или небольшая нейронная сеть.

Искусственный интеллект может дополнительно улучшить процесс, предсказывая оптимальные пороги разбиения и генерируя параметры интерполяции, обучаясь восстанавливать высококачественные детали из микротекстур. Таким образом,

традиционные кодировщики могут быть усилены адаптивными нейросетевыми модулями, повышающими эффективность и качество конечного результата. Сводная таблица 4 по методам сжатия представлена ниже.

Заключение

Традиционные растр-ориентированные методы и векторные оптимизации предоставляют разные компромиссы между размером, скоростью и качеством. Легкие без-потерь форматы ускоряют обработку, но не всегда достигают высоких коэффициентов; методы с потерями предоставляют сильное сжатие ценой артефактов. Векторные форматы сохраняют масштабируемость, однако их эффективность падает при попытке хранить фотоматериалы.

Интерполяционный гибрид представляет собой перспективное развитие: он разбивает изображение на адаптивные фрагменты, описывает их вектором и сохраняет локальные детали в виде микротекстур с параметризованной интерполяцией. Такой «симбиоз» объединяет преимущества обоих подходов, позволяя добиться высокой степени сжатия без потери масштабируемости.

ИИ-технологии могут дополнительно улучшить все этапы – от автоматического разбиения изображения до генерации оптимальных интерполяционных функций, делая процесс адаптивным к содержимому и требуемой визуальной точности.

В совокупности эти направления формируют гибкую экосистему сжатия, способную обслуживать широкий спектр современных требований: от быстрых веб-интерфейсов и мобильных приложений, до профессионального печатного производства. Дальнейшее сочетание традиционных алгоритмов, интерполяционных гибридов и нейросетевых моделей обещает существенное снижение трафика и ресурсов при сохранении высокого качества визуального контента.

Литература

1. Сэломон Д. Сжатие данных, изображений и звука / М.: Техносфера, 2004. – 368 с.
2. Гарев, К. В. Сравнительный анализ методов сжатия табличных данных / К. В. Гарев // Программные продукты и системы. – 2024. – № 2. – С. 170-177. – DOI 10.15827/0236-235X.146.170-177.
3. Krainyk Y. Method of Image Compression Using Image Preprocessing, and Huffman and Quite Ok Image Algorithms / Elektronnoe modelirovanie. 2024. Vol 46. No. 2. pp. 75-87.
4. Alakuijala J., Boukott S., Szabadka Z. JPEG XL next-generation image compression architecture and coding tools / Conference: Applications of Digital Image Processing XLII. 2019 Sep.
5. Зинюк, О. В. Компьютерные технологии. Часть 2. Обработка векторных изображений. Учебное пособие / О. В. Зинюк. – М.: Московский гуманитарный университет, 2012. – 96 с.

ПРОБЛЕМА ВИЗУАЛИЗАЦИИ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ В САПР: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Е.В. Конопацкий¹, профессор, д-р техн. наук

К.Ю. Кожанова^{1,2}, аспирант

¹Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет,
Нижний Новгород
e.v.konopatskiy@mail.ru

²Академия лидерства и администрирования бизнес-процессов ФНС России – филиал
Академия ФНС ЛАБ, Нижний Новгород
shulina.kseniya@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются современные проблемы визуализации твердотельных моделей в системах автоматизированного проектирования. Выполнен анализ существующих подходов к представлению геометрии, включая точечное, каркасное и граничное представления, конструктивную геометрическую модель, а также воксельную и неявную модели. Показано, что дальнейшее увеличение сложности инженерных сборок, развитие технологий цифровых двойников, аддитивного производства и многомасштабного моделирования приводят к существенному возрастанию требований к средствам визуализации геометрических данных. Рассмотрены современные методы визуализации, основанные на использовании аппаратно-ускоренной трассировки лучей, GPU-ориентированных графических конвейеров, mesh-шейдеров, технологий рендеринга с использованием внешней памяти, а также нейросетевых методов представления геометрических моделей. Особое внимание уделено перспективному направлению твердотельного моделирования в точечном исчислении, в рамках которого геометрическое тело рассматривается как трёхпараметрическое множество точек в трёхмерном пространстве, что позволяет представить геометрическую модель как выделенную часть трёхмерного пространства. Подобный подход позволяет перейти от поверхностного описания геометрии к объёмному представлению твёрдого тела и обладает потенциалом для разработки САПР нового поколения, однако одновременно ставит ряд принципиально новых научных задач в области визуализации, что приводит к необходимости разработки специализированных методов объёмного рендеринга, ориентированных на аналитические объёмные представления геометрических моделей в САПР.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 25-21-00003: <https://rscf.ru/project/25-21-00003/>.

Введение

Современные системы автоматизированного проектирования являются одним из базовых инструментов инженерной деятельности. Геометрические модели используются практически на всех этапах жизненного цикла изделия: при проектировании, инженерном анализе, подготовке производства, формировании цифровых двойников и последующей эксплуатации технических объектов [1, 2].

В течение последних десятилетий наблюдается устойчивое увеличение сложности геометрических моделей. Если раньше типовые модели САПР содержали сравнительно небольшое количество геометрических примитивов, то современные инженерные сборки могут включать сотни миллионов полигонов, большое количество параметрических зависимостей и сложные иерархические структуры. Особенно заметно данная тенденция проявляется в авиастроении, судостроении, энергетике, а также в BIM-системах.

Несмотря на значительный рост производительности графических процессоров, проблема интерактивной визуализации сложных инженерных сцен остаётся актуальной. В ряде случаев ограничения связаны уже не столько с вычислительными возможностями

графических процессоров, сколько с особенностями существующих способов представления геометрии и архитектурой графических конвейеров [3].

Наибольшее распространение в современных САПР получило граничное представление твёрдого тела (Boundary Representation, B-Rep), в рамках которого геометрия определяется посредством ориентированной замкнутой оболочки [4, 5]. Подобный подход оказался чрезвычайно эффективным и стал фактическим промышленным стандартом. Вместе с тем граничное представление ориентировано прежде всего на описание поверхности объекта, тогда как внутренний объём тела явно не задаётся.

Развитие аддитивных технологий, многомасштабного моделирования, задач анализа внутренней структуры объектов и моделирования неоднородных материалов постепенно приводит к необходимости использования объёмных представлений геометрии [6]. В связи с этим возрастает интерес к альтернативным методам твердотельного моделирования, основанным на аналитическом описании твердотельных моделей как выделенной части пространства.

Одним из подобных научных направлений является точечное исчисление [1, 7-9]. В рамках данного подхода геометрическое тело рассматривается как множество точек пространства, определяемое системой параметрических зависимостей. При этом число независимых параметров соответствует размерности рассматриваемого пространства. Авторы данного подхода отмечают, что подобное представление позволяет отказаться от традиционной поверхностной трактовки твёрдого тела и перейти к объёмному аналитическому описанию геометрической модели.

Следует отметить, что существующие графические конвейеры исторически ориентированы преимущественно на обработку поверхностной полигональной геометрии, поскольку другой раньше не существовало. Даже современные средства аппаратной трассировки лучей в большинстве случаев предполагают наличие триангулированного представления сцены. Вследствие этого переход к объёмным аналитическим моделям требует переосмысления ряда фундаментальных принципов визуализации.

Целью настоящей работы является анализ современного состояния методов визуализации твердотельных моделей в САПР, а также рассмотрение перспективных направлений развития средств визуализации применительно к аналитическим объёмным представлениям геометрии.

Представление геометрических тел в САПР и особенности их визуализации

Среди множества представлений твердотельных геометрических моделей выделим САПР и рассмотрим более подробно основополагающие.

1. Точечные геометрические модели (point-based representations) представляют геометрический объект в виде совокупности точек пространства, каждая из которых может содержать дополнительную информацию: координаты, нормаль, цвет, плотность, параметры материала и иные атрибуты [10, 11]. В отличие от полигональных моделей, в точечных представлениях отсутствует явное описание поверхности через систему граней и рёбер. Геометрия объекта формируется как дискретное множество точек.

Первоначально точечные модели получили широкое распространение в задачах обработки результатов лазерного сканирования, фотограмметрии, трёхмерной реконструкции объектов и обработки данных LiDAR. В дальнейшем развитие вычислительной графики и аппаратно-ускоренных методов визуализации привело к активному использованию точечного представления в задачах интерактивного рендеринга и визуализации сложных пространственных сцен [10].

Одним из основных достоинств точечных моделей является простота формирования геометрических данных. Облака точек могут быть непосредственно получены в результате трёхмерного сканирования, стереофотограмметрии или процедурной генерации. Также, точечные представления хорошо подходят для описания объектов со сложной топологией, нерегулярной поверхностью и высокой степенью геометрической неоднородности.

С точки зрения визуализации точечные модели обладают рядом существенных преимуществ. Прежде всего отсутствует необходимость построения и хранения топологических связей между элементами модели. Это упрощает потоковую передачу данных, позволяет эффективно использовать параллельные вычисления на GPU и облегчает реализацию уровней детализации (LOD). Дополнительным достоинством является возможность динамического изменения плотности точек в зависимости от положения наблюдателя и требуемой точности визуализации [11].

Развитие современных методов точечного представления привело к появлению технологий splatting-визуализации. Наибольший интерес в последние годы вызывает метод 3D Gaussian Splatting, предложенный Kerbl и соавторами [12]. В рамках данного подхода каждая точка интерпретируется как трёхмерный гауссов примитив, проецируемый на экран с использованием процедур альфа-композитинга. Такой метод позволяет получать высококачественное изображение без предварительного построения полигональной сетки и демонстрирует высокую производительность на современных GPU.

Вместе с тем точечные модели имеют и ряд существенных ограничений. Одной из основных проблем является отсутствие явной топологической структуры и аналитически определённой поверхности. Для инженерных задач, связанных с выполнением булевых операций, вычислением пересечений, построением сечений и обеспечением геометрической точности, подобное представление оказывается недостаточным.

Дополнительные трудности возникают при визуализации разреженных облаков точек. При недостаточной плотности дискретизации возможно появление шумов, разрывов поверхности и визуальных артефактов. Для повышения качества изображения нередко требуется применение методов сглаживания, интерполяции или реконструкции поверхности [10].

Следует также отметить значительный объём данных, характерный для высокоточных облаков точек. Современные результаты лазерного сканирования могут содержать сотни миллионов и даже миллиарды точек, что предъявляет повышенные требования к памяти, пропускной способности графической подсистемы и алгоритмам рендеринга с использованием внешней памяти.

Таким образом, точечные модели представляют значительный интерес прежде всего для задач обработки результатов сканирования, реконструкции геометрии и визуализации сложных пространственных сцен. Однако отсутствие явной топологической структуры ограничивает их применение в качестве полноценной замены традиционных геометрических представлений в САПР.

2. Каркасные модели (wireframe models) являются одним из наиболее ранних способов представления геометрии в системах автоматизированного проектирования [4, 13]. В рамках данного подхода объект описывается совокупностью вершин и соединяющих их рёбер без явного задания граней и внутреннего объёма тела.

Исторически каркасное моделирование получило широкое распространение в ранних САПР вследствие сравнительно низких вычислительных требований [14]. Формирование изображения сводилось к отображению набора линейных примитивов, что обеспечивало возможность интерактивной работы даже на вычислительных системах с ограниченной производительностью.

Основным достоинством каркасных моделей является простота представления геометрии и высокая скорость визуализации. Объём графических данных при этом существенно меньше по сравнению с поверхностными и твердотельными моделями. Кроме того, каркасное представление позволяет удобно анализировать внутреннюю структуру объекта, поскольку отсутствует перекрытие внутренних элементов непрозрачными поверхностями.

В инженерной практике каркасные модели до настоящего времени применяются при построении эскизной геометрии, формировании вспомогательных конструкций,

визуализации кинематических схем, траекторий движения и пространственных зависимостей.

С точки зрения визуализации каркасные модели обладают рядом характерных особенностей. Отсутствие необходимости тесселяции, расчёта освещения и обработки поверхностей обеспечивает высокую производительность графического конвейера. Каркасная визуализация также широко используется как средство диагностики геометрических ошибок и анализа структуры модели [14].

Однако каркасное представление имеет и важные принципиальные ограничения. Прежде всего подобные модели не позволяют однозначно определить внутреннюю и внешнюю области объекта. Один и тот же набор рёбер может соответствовать различным пространственным формам. Вследствие этого каркасные модели плохо подходят для задач инженерного анализа, прочностных расчётов, генерации управляющих программ и аддитивного производства.

Дополнительной проблемой является низкая информативность визуализации сложных сцен. При увеличении количества рёбер изображение становится перегруженным, появляются многочисленные пересечения линий, затрудняющие восприятие пространственной формы объекта. Отсутствие поверхностей, теней и эффектов освещения также ухудшает визуальное восприятие геометрии.

В современных САПР каркасное представление используется преимущественно как вспомогательный режим отображения. Основными форматами хранения геометрии в настоящее время остаются поверхностные и твердотельные модели [4]. Тем не менее каркасная визуализация сохраняет практическую значимость благодаря своей вычислительной простоте, высокой скорости отображения и удобству анализа геометрической структуры объектов.

3. Граничное представление. В настоящее время граничное представление является основным способом представления геометрии в промышленных САПР, математический аппарат которых разрабатывался ещё в прошлом веке [4, 13]. В рамках данного подхода твёрдое тело определяется совокупностью граней, рёбер и вершин, связанных топологическими связями.

Основным достоинством граничного представления является высокая точность представления формы. Использование аналитических поверхностей, в частности NURBS, позволяет выполнять устойчивые булевы операции и обеспечивать требуемую инженерную точность [2, 4, 5, 13].

Вместе с тем визуализация геометрических моделей B-Rep сопровождается рядом существенных трудностей. Прежде всего аналитическая геометрия должна быть предварительно преобразована в полигональное представление посредством процедуры тесселяции. Таким образом, между геометрическим ядром и графическим процессором возникает дополнительный этап подготовки данных [3].

Дополнительные сложности возникают при работе с параметрическими сборками большого объёма. Изменение параметров модели приводит к необходимости перестроения топологии, повторной тесселяции и обновления графических буферов. На практике именно подготовка геометрических данных с помощью центрального процессора нередко становится ограничивающим фактором производительности САПР. Кроме того, поверхностная природа граничных геометрических моделей затрудняет описание внутренней структуры объектов, неоднородных материалов и функционально-градиентных сред.

4. Конструктивное геометрическое моделирование (Constructive Solid Geometry, CSG) основано на представлении объекта как результата логических операций над набором аналитически заданных примитивов [15].

С математической точки зрения данный подход обладает рядом преимуществ. Геометрическая модель может храниться в виде дерева операций, а сами примитивы описываются аналитически. Для визуализации CSG-моделей обычно используются либо

предварительное преобразование в B-Rep, либо непосредственная трассировка лучей по дереву операций.

Следует отметить, что вычислительная сложность прямой визуализации CSG-сцен существенно возрастает с увеличением глубины дерева операций. По этой причине в современных САПР CSG чаще используется как вспомогательное представление геометрии.

5. Воксельные модели описывают пространство посредством дискретной трёхмерной сетки [16]. В отличие от B-Rep, подобные представления естественным образом формируют структуру внутреннего пространства геометрического тела.

Преимуществом воксельных моделей является возможность непосредственной объёмной визуализации без необходимости предварительного построения поверхностной сетки. Подобные методы широко применяются в визуализации медицинских данных, задачах томографии и аддитивного производства.

Однако использование вокселей сопровождается существенными затратами памяти. Даже при использовании иерархических структур, таких как Octree, объём данных остаётся весьма значительным. Кроме того, дискретный характер представления приводит к ступенчатости поверхностей и необходимости дополнительной фильтрации.

6. Неявные представления и функции расстояния. В последние годы значительный интерес вызывают неявные представления геометрии, основанные на использовании функций вида: $F(x, y, z) = 0$. Одним из наиболее распространённых вариантов такого представления являются знаковые функции расстояния (signed distance functions, SDF), в которых значение функции соответствует расстоянию до поверхности с учётом знака. Преимуществом подобных представлений является компактность аналитического описания и возможность естественного задания плавных деформаций и процедурной геометрии.

В современных исследованиях активно развиваются нейросетевые варианты неявных представлений. Так, в работе Guo и соавторов предложен метод HR-IDF, основанный на использовании неявных полей смещения с гессиановской регуляризацией [17]. В другой работе рассматривается подход BR-DF, позволяющий описывать B-Rep-модель посредством объёмных функций расстояния [18].

Тем не менее визуализация подобных моделей остаётся вычислительно сложной задачей. Большинство алгоритмов Ray marching требуют большого числа последовательных итераций, что затрудняет эффективное использование традиционных графических конвейеров.

7. Твёрдотельные модели, как выделенная часть пространства. В работах [1, 7-9] был предложен и успешно развивается подход, в рамках которого геометрическое тело рассматривается не как совокупность поверхностей, а как выделенная часть пространства. Это определение выходит из геометрического представления объектов пространства в виде упорядоченного множества точек. Только не дискретного множества, как в точечном представлении, а непрерывного, формирующего единый объект пространства. Параметризация таких геометрических объектов выполняется с помощью векторно-параметрических уравнений в точечном исчислении.

Для трёхмерного случая модель определяется отображением: $M = M(u, v, w)$, где параметры u, v, w задают положение точки внутри объёма тела. Такая модель одним уравнением описывает форму, положение и внутреннюю структуру геометрического объекта.

Использование точечного исчисления позволяет:

- отказаться от поверхностной трактовки твёрдого тела;
- описывать внутреннюю структуру геометрических объектов;
- задавать неоднородные материалы;
- реализовывать многомасштабные модели;
- уменьшать объём передаваемых геометрических данных.

При этом аналитическое описание геометрии оказывается существенно компактнее традиционных полигональных представлений.

Например, аффинный параллелепипед описывается четырьмя координатными векторами $A(x_A, y_A, z_A)$, $B(x_B, y_B, z_B)$, $C(x_C, y_C, z_C)$, $D(x_D, y_D, z_D)$, которые однозначно определяют его форму, положение и внутреннюю структуру пространства:

$$M = Au + Bv + Cw + D(1 - u - v - w).$$

⇓

$$\begin{cases} x_M = (x_A - x_D)u + (x_B - x_D)v + (x_C - x_D)w + x_D \\ y_M = (y_A - y_D)u + (y_B - y_D)v + (y_C - y_D)w + y_D \\ z_M = (z_A - z_D)u + (z_B - z_D)v + (z_C - z_D)w + z_D \end{cases}$$

Современные методы визуализации в САПР

1. Классическая растеризация. Несмотря на активное развитие технологий трассировки лучей, основой большинства САПР по-прежнему остаётся растеризация [14]. Подобный подход обеспечивает чрезвычайно высокую производительность при обработке треугольных мешей, поскольку архитектура современных GPU в значительной степени оптимизирована именно под данный сценарий. Однако классический графический конвейер ориентирован прежде всего на поверхностную полигональную геометрию. Вследствие этого любые объёмные аналитические модели фактически должны быть предварительно преобразованы в поверхностное представление.

2. Аппаратная трассировка лучей. Существенным этапом развития компьютерной графики стало появление аппаратно-ускоренной трассировки лучей, реализованной в архитектурах NVIDIA RTX и API DXR/Vulkan RT. В отличие от растеризации, трассировка лучей позволяет более корректно моделировать процессы распространения света, что особенно важно при инженерной визуализации материалов и сложных отражающих поверхностей. Вместе с тем существующие RTX-конвейеры также ориентированы преимущественно на треугольную геометрию. Базовым примитивом большинства реализаций остаётся треугольник, а производительность определяется эффективностью построения BVH-структур. Таким образом, применение аппаратной трассировки лучей к аналитическим объёмным моделям без промежуточной дискретизации пока остаётся ограниченным.

3. GPU-ориентированные методы визуализации. Одним из наиболее заметных направлений развития современной компьютерной графики является перенос значительной части операций управления визуализацией непосредственно на GPU. Традиционный графический конвейер предполагает активное участие центрального процессора в подготовке команд рендеринга. При работе с крупными инженерными сборками подобный подход приводит к существенным вычислительным затратам. Развитие технологии GPU-ориентированного рендеринга и mesh-шейдеров позволяет частично решить данную проблему. В отличие от классических vertex-шейдеров, mesh-шейдеры предоставляют графическому процессору возможность самостоятельно формировать и отбрасывать геометрические примитивы. Подобные технологии могут оказаться перспективными и для визуализации аналитически заданных моделей. В частности, mesh-шейдеры потенциально допускают динамическую генерацию геометрии непосредственно на GPU на основе векторно-параметрических уравнений точечного исчисления, что может быть применимо для визуализации твердотельных моделей в виде выделенной части пространства.

4. Ray Marching и визуализация аналитической геометрии. Для неявных представлений геометрии значительный интерес представляет метод Ray marching [19]. В отличие от классической трассировки лучей, здесь отсутствует необходимость вычисления точного пересечения с треугольными примитивами. Луч последовательно перемещается в

пространстве на величину, определяемую значением функции расстояния. Подобный подход хорошо согласуется с идеологией аналитических объёмных моделей и может использоваться при визуализации представления твердотельных моделей в виде выделенной части пространства [20]. Вместе с тем последовательный характер вычислений приводит к существенным затратам вычислительных ресурсов. При усложнении геометрии количество итераций возрастает, что приводит к снижению производительности.

5. Нейронный рендеринг и Gaussian Splatting. В последние годы значительное развитие получили методы нейронного рендеринга, в частности Neural Radiance Fields (NeRF) и 3D Gaussian Splatting [12, 21].

Метод Gaussian Splatting основан на представлении сцены в виде совокупности трёхмерных гауссовых примитивов. Рендеринг осуществляется посредством проецирования гауссовых распределений на экран с последующим альфа-компози́тингом.

К числу достоинств данного подхода относятся:

- высокая скорость визуализации;
- отсутствие необходимости в триангуляции;
- возможность непосредственной работы с облаками точек;
- хорошее качество реконструкции сложных сцен.

Следует отметить, что точечное исчисление также оперирует множествами точек пространства, представленными в виде координатных векторов [7-9]. В связи с этим представляется перспективным использование Gaussian Splatting при построении систем визуализации аналитических объёмных моделей.

6. Визуализация больших инженерных моделей. Рост сложности инженерных сборок приводит к необходимости обработки чрезвычайно больших объёмов геометрических данных. Одним из распространённых подходов является рендеринг с использованием внешней памяти, при котором в памяти графического процессора хранится только та часть геометрии, которая необходима для построения текущего кадра.

Дополнительным направлением развития являются облачные САПР, в которых существенная часть вычислений выполняется на удалённых сервера [22]. Подобный подход позволяет использовать распределённые GPU-кластеры, однако одновременно приводит к возникновению новых проблем, связанных с сетевыми задержками и потоковой передачей геометрии.

Следует отметить, что во многих современных САПР значительная часть операций геометрической обработки по-прежнему выполняется на CPU. К числу подобных операций относятся:

- перестроение B-Rep;
- тесселяция;
- обновление топологии;
- формирование графических буферов.

По этой причине развитие GPU-ориентированных методов визуализации представляется одним из наиболее актуальных направлений совершенствования современных САПР.

Проблема визуализации твердотельных геометрических моделей в виде выделенной части пространства

Несмотря на концептуальную привлекательность точечного исчисления, одной из основных проблем остаётся визуализация твердотельных геометрических моделей в виде выделенной части пространства. Существующие графические конвейеры ориентированы преимущественно на обработку поверхностной геометрии [3]. Даже современные средства аппаратной трассировки лучей предполагают наличие явных геометрических примитивов. Таким образом, возникает определённое противоречие между тем, что аналитические объёмные модели не требуют явных полигональных сеток, и тем, что графические

процессоры ориентированы именно на полигональные представления, поскольку других представлений раньше просто не было.

Наиболее очевидным решением является извлечение поверхности из аналитической модели с последующим построением B-Rep, который является частным случаем предложенного подхода к твердотельному моделированию. Однако в этом случае частично утрачиваются преимущества объёмного представления.

В связи с этим наибольший интерес представляют методы, допускающие непосредственную визуализацию аналитически заданной твердотельной геометрической модели:

- Ray marching, потому что не требует явного полигонального представления геометрии. Луч последовательно дискретно перемещается вдоль направления взгляда, а решение о пересечении с телом принимается на основе анализа значений параметрических уравнений в точках остановки. Это позволяет визуализировать аналитически заданный объём напрямую, без извлечения поверхностных граней, сохраняя информацию о внутренней структуре тела.

- SDF-представления, потому что могут быть вычислены непосредственно из параметрических уравнений точечной модели как аналитические функции расстояния до границы тела или как результат решения системы уравнений пересечения. Полученная функция расстояния затем используется в алгоритмах Ray marching, обеспечивая компактное и точное представление геометрии без триангуляции.

- GPU-ориентированный рендеринг, потому что параметрические уравнения точечной модели позволяют генерировать геометрические примитивы (точки, треугольники и др.) непосредственно на GPU на основе значений параметров u , v , w , минуя этап хранения и передачи больших вершинных буферов через шину CPU-GPU. Это делает GPU-ориентированный рендеринг естественным конвейером для процедурно-генерируемых объёмных моделей.

- Gaussian Splatting, потому что твердотельные геометрические модели, параметризованные в точечном исчислении, представляют собой упорядоченное множество точек, что является идеальным входным форматом для инициализации 3D-гауссовых сплатов. Последующая растеризация гауссианов не требует построения BVH или триангуляции, обеспечивая высокоскоростную визуализацию объёмных данных с сохранением внутренней структуры.

- Гибридные объёмно-ориентированные подходы, потому что они комбинируют извлечение B-Rep границ (путём фиксации предельных значений параметров) для быстрого предпросмотра внешней формы с методами объёмного рендеринга (Ray marching, Gaussian Splatting) для визуализации сечений, внутренних полостей и распределённых свойств материала. Это позволяет использовать преимущества каждого метода в зависимости от конкретной задачи визуализации.

Заключение

Проведённый анализ показывает, что современные методы визуализации в САПР достигли высокого уровня развития. Аппаратная трассировка лучей, GPU-ориентированные графические конвейеры, mesh-шейдеры и нейросетевые методы представления геометрии существенно расширили возможности компьютерной графики. Вместе с тем большинство существующих систем визуализации по-прежнему ориентировано преимущественно на поверхностные представления геометрии. Подобный подход хорошо согласуется с традиционными B-Rep-моделями, однако оказывается менее эффективным при переходе к аналитическим объёмным представлениям.

Развитие точечного исчисления позволяет рассматривать геометрическое тело как непрерывное множество точек пространства, а не как замкнутую оболочку [1, 9-11]. Подобный подход потенциально открывает возможности для построения САПР нового поколения, ориентированных на моделирование внутренней структуры объектов и объёмных

свойств материалов. В результате проведенного анализа установлено, что наиболее перспективными направлениями развития средств визуализации для подобных твердотельных моделей являются:

- использование Ray marching на основе аналитических функций расстояния;
- GPU-ориентированный рендеринг;
- адаптация методов Gaussian Splatting;
- построение гибридных систем визуализации, основанных на объёмном представлении.

Дальнейшее развитие объёмных методов моделирования и визуализации может привести к постепенному переходу от поверхностного к объёмному представлению геометрических моделей в САПР, в рамках которого геометрическая модель будет описывать не только внешнюю границу объекта, но и структуру его внутреннего пространства.

Литература

1. Подход к твёрдотельному моделированию геометрических объектов в точечном исчислении / Е. В. Конопацкий, С. И. Ротков, М. В. Лагунова, М. В. Безсольников // *Онтология проектирования*. – 2025. – Т. 15, № 1(55). – С. 24-33. – DOI 10.18287/2223-9537-2025-15-1-24-33.
2. Stroud, I. Solid Modelling and CAD Systems / I. Stroud, H. Nagy // London: Springer, 2011. – 689 p. – DOI 10.1007/978-0-85729-259-9.
3. Real-Time Rendering / T. Akenine-Möller, E. Haines, N. Hoffman [et al.] // 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 2018. – 1198 p.
4. Requicha, A.A.G. Representations for Rigid Solids: Theory, Methods, and Systems / A.A.G. Requicha // *ACM Computing Surveys*, 1980. – Vol. 12, No. 4. – pp. 437-464.
5. Голованов, Н.Н. Геометрическое моделирование / Н.Н. Голованов // М.: ДМК Пресс, 2024. – 408 с.
6. Вяткин, С. И. Геометрическое моделирование и визуализация функционально заданных объектов на базе функций возмущения с использованием графических акселераторов / С. И. Вяткин, М. А. Городилов, Б. С. Долговесов // *Научная визуализация*. – 2010. – Т. 2, № 3. – С. 22-49.
7. Principles of solid modelling in point calculus / E.V. Konopatskiy, A.A. Bezdityni, M.V. Lagunova, A.V. Naidysh // *IoP conference series: Journal of Physics: Conf. Series* 1901 (2021) 012063. – DOI: 10.1088/1742-6596/1901/1/012063.
8. Конопацкий, Е.В. Параметрическое моделирование линейных геометрических тел в точечном исчислении / Е.В. Конопацкий, М.В. Безсольников, Н.Д. Чучмар // *Приволжский научный журнал*. – 2025. – № 4(76). – С. 303-312.
9. Бездитный, А.А. Концепция твердотельного геометрического моделирования в точечном исчислении: дис. ... д-ра техн. наук. – Нижний Новгород, 2025. – 329 с.
10. Gross, M. Point-Based Graphics / M. Gross, H. Pfister // San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2007. – 516 p.
11. Polygon Mesh Processing / M. Botsch, L. Kobbelt, M. Pauly [et al.] // Boca Raton: CRC Press, 2010. – 250 p. – DOI 10.1201/b10688.
12. 3D Gaussian Splatting for Real-Time Radiance Field Rendering / B. Kerbl, G. Kopanas, T. Leimkühler, G. Drettakis // *ACM Transactions on Graphics (TOG)*. – 2023. – Vol. 42, No. 4. – pp. 1-14. – DOI 10.1145/3592433.
13. Mäntylä, M. An Introduction to Solid Modeling / M. Mäntylä // San Francisco: W.H. Freeman and Company, 1988. – 401 p.
14. Computer Graphics: Principles and Practice / J.D. Foley, A. van Dam, S.K. Feiner, J.F. Hughes // 2nd ed. – Boston: Addison-Wesley, 1995. – 1175 p.
15. Hoffmann, C. Geometric and Solid Modeling / C. Hoffmann // San Mateo: Morgan Kaufmann, 1989. – 295 p.
16. Караваев, А. С. Построение адаптивных шестигранных сеток из поверхностной и воксельной геометрических моделей / А. С. Караваев, С. П. Копысов // *Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки*. – 2023. – Т. 33, № 3. – С. 534-547. – DOI 10.35634/vm230310.
17. HR-IDF: Hessian-Regularized Implicit Displacement Fields for high precision industrial assembly representation / L. Guo, Yu. Ohtake, T. Yatawaga [et al.] // *Computers & Graphics*. – 2025. – Vol. 133. – P. 104442. – DOI 10.1016/j.cag.2025.104442.
18. B-Rep Distance Functions (BR-DF): How to Represent a B-Rep Model by Volumetric Distance Functions? / Z. Fuyang, K.J. Pradeep, X. Xiang, F. Yasutaka // *arXiv preprint*. 2025. arXiv:2511.14870.
19. An Unbiased Ray-Marching Transmittance Estimator / M. Kettunen, E. D'Eon, J. Pantaleoni, J. Novák // *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2021. – Vol. 40, No. 4. – pp. 1-20. – DOI 10.1145/3450626.34599.

20. Конопацкий, Е. В. Визуализация геометрических моделей гранных тел в точечном исчислении / Е. В. Конопацкий, К. В. Рябинин, А. А. Бездитный // Научная визуализация. – 2023. – Т. 15, № 1. – С. 60-70. – DOI 10.26583/sv.15.1.05.
21. NeRF: Representing Scenes as Neural Radiance Fields for View Synthesis / B. Mildenhall, P.P. Srinivasan, M. Tancik [et al.] // ECCV, 2020. – pp. 405-421. – DOI 10.1007/978-3-030-58452-8_24.
22. Efficient Rendering of Large-Scale CAD Models on a GPU Virtualization Architecture with Model Geometry Metrics / J. Xue, X. Zhai, H. Qu // 2019 IEEE International Conference on Service-Oriented System Engineering (SOSE). – San Francisco, CA, USA, 2019. – pp. 251-2515. – DOI 10.1109/SOSE.2019.00043.

ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ОБУЧЕНИЯ НЕЙРОСЕТЕЙ

Е.Ю. Лоточ¹, аспирант

Б.Ю. Лемешко¹, профессор, д-р техн. наук

¹ *Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск*
lotoch3@yandex.ru

Аннотация. Предложен подход к анализу обучения нейросетей на основе согласованности статистических характеристик активаций. Разработан инструмент для вычисления более 18 показателей, включая корреляцию между асимметрией и эксцессом активаций, индекс фрустрации градиентов и нормированную сложность активаций. Установлено, что высокая положительная корреляция между асимметрией и эксцессом предсказывает успешное обучение, а отрицательная – структурную несовместимость. Высокая сложность активаций и высокая фрустрация градиентов создают условия для выхода из локальных минимумов и достижения высокой точности, тогда как высокая фрустрация при низкой сложности приводит к стагнации.

Введение

Современные нейросети достигли значительных успехов в решении прикладных задач, однако вопрос о причинах успешного обучения одних архитектур и нестабильности других остаётся открытым. Ответ на него требует анализа не только итоговой точности, но и внутренних механизмов формирования представлений в процессе обучения. Архитектура сети задаёт правила преобразований, такие как количество слоёв, типы связей, функции активации, определяя, сможет ли сеть выделить значимые закономерности или начнёт запоминать шум. Одним из передовых способов, ставших доступным благодаря возросшим мощностям ЭВМ, является анализ статистических свойств активаций, то есть выходов отдельных слоёв. Форма распределения этих активаций и выявление статистических закономерностей позволяет судить о том, насколько структурированными стали представления.

В рамках решения данной задачи был разработан программный инструмент, позволяющий анализировать нейронные сети с использованием аппарата классической математической статистики, обеспечивающий оценку более 18 показателей и представление 12 различных графиков, а также дающий возможность выгрузить “сырые” активации слоёв для дополнительного анализа в других программах. В настоящей работе предлагается вместо анализа независимых статистик исследовать их согласованность при переходе от слоя к слою. Это позволяет оценить структурную целостность сети и предсказать успешность обучения на самой ранней стадии.

Ранее авторами работы [1] исследовалось влияние распределения весов нейросети на точность модели. В [1] было установлено наличие положительной корреляции между асимметрией распределения весов и точностью, однако связи между эксцессом и точностью обнаружено не было. В настоящем исследовании анализируются не веса, а активации – выходы слоев сети, что представляет собой принципиально иной объект анализа. Кроме того, в отличие от [1], в данной работе рассматривается совместное поведение асимметрии и эксцесса, а не их независимое влияние. В работе [2] предложена архитектура ASKNN, в которой асимметрия и эксцесс используются как настраиваемые параметры внутри слоя для улучшения способности сети к интеграции признаков. Данный подход, равно как и работа [3], где асимметрия и эксцесс применяются в качестве входных признаков нейросети для проверки нормальности распределения данных, решает иную задачу – конструирование сети или проверку свойств входных данных, а не анализ внутренних состояний в процессе

обучения. В исследовании [4] показано, что коэффициенты корреляции между статистическими признаками (включая асимметрию и эксцесс) могут улучшать классификационную способность нейросетей. Однако в [4] корреляция вычисляется между различными признаками одного объекта (частичного разряда), тогда как в настоящей работе корреляция вычисляется между двумя статистическими характеристиками (асимметрией и эксцессом) при переходе от слоя к слою. Это позволяет диагностировать не свойства отдельных объектов, а структурную согласованность всей сети. Таким образом, полученные результаты вносят вклад в понимание внутренних механизмов обучения нейросетей с точки зрения статистических свойств распределений активаций.

Исходные данные

В работе использованы три набора данных для многоклассовой классификации. Набор Spine (310 наблюдений) – клинические данные позвоночника с бинарной целевой переменной. Набор Wine (178 наблюдений) – химические показатели красного вина, три класса качества. Набор Anneal (898 наблюдений) – данные процесса отжига стали, пять классов. Этот набор содержит категориальные признаки, пропуски и выбросы, а также подвергнут предобработке (кодирование, заполнение пропусков медианой, стандартизация).

Исследованы две архитектуры. Архитектура CNN_light - сверточная сеть для одномерных данных: два сверточных слоя (32 и 64 фильтра, размер ядра свёртки - 3), субдискретизация и усреднение. Архитектура Dense_5 - полносвязная сеть с пятью скрытыми слоями (128, 128, 64, 64, 32 нейрона). Для всех скрытых слоев обеих архитектур использована функция активации tanh, что обеспечивает сопоставимость анализа распределений активаций. В обеих архитектурах установлен softmax в качестве выходной функции активации. Обучение проводилось в течение 10–50 эпох, валидационная выборка составляла 30% с сохранением пропорций классов.

Методология

В ходе работы разработан инструмент для динамического анализа (по эпохам) процесса обучения нейросетей на валидационном наборе. Программа позволяет вычислить выборочное арифметическое среднее активаций нейронов скрытого слоя по всей валидационной выборке за фиксированную эпоху обучения; асимметрию, эксцесс, выборочную дисперсию активаций нейронов скрытого слоя по всей валидационной выборке за фиксированную эпоху обучения; спектральную норму (норму оператора) матрицы активаций скрытого слоя за фиксированную эпоху обучения; степень разреженности активаций скрытого слоя за фиксированную эпоху обучения; корреляционную фрактальную размерность множества точек в пространстве активаций скрытого слоя за фиксированную эпоху; взаимную информацию между активациями двух различных слоёв за фиксированную эпоху; аппроксимацию нормы якобиана отображения вход-выход для скрытого слоя по вариациям вдоль батча; квантильное расстояние между распределениями активаций текущего и предыдущего слоёв (или между текущим слоем и входными данными); многомасштабную энтропию (энтропию активаций на масштабах прореживания, возвращая спектр энтропии, как функцию масштаба); коэффициент участия (меру эффективной размерности пространства активаций скрытого слоя через сингулярные числа); нормированную сложность по Лемполю-Зиву для последовательности активаций скрытого слоя; профиль аппроксимации низкого ранга для матрицы активаций скрытого слоя (меру того, насколько хорошо данные представляются подпространствами различной размерности); логарифмическую чувствительность нормы активаций к малым случайным возмущениям; дифференциальную энтропию распределения активаций скрытого слоя, аппроксимированную через гистограмму; энтропию Шеннона нормированного спектра сингулярных чисел якобиана; среднюю абсолютную межнейронную корреляцию (меру линейной связности активности и разных нейронов в слое); индекс фрустрации (меру конфликта между направлениями обновлений для разных примеров в батче, основанную на

косинусном расстоянии между градиентами). Реализована проверка нормальности по критериям Андерсона-Дарлинга, Шапиро-Уилка, Колмогорова, Лиллиефорса, Харке-Бера, Д'Агостино, Хи-квадрат Пирсона. Разработанный инструментарий даёт возможность вывести в качестве графиков: информационный поток по слоям; стабильность по глубине; критические точки преобразований; динамику обучения по эпохам; многомасштабную энтропию; профили нейронов; “сырые” распределения активаций; плотности распределений активаций; функции распределений; корреляционные матрицы метрик; эволюции функции распределения по слоям; эволюции функции распределения по эпохам.

Пусть для фиксированной эпохи обучения имеется L слоёв нейросети. Для каждого слоя $l = 1, \dots, L$ на основе валидационной выборки вычисляются оценки асимметрии $\hat{\gamma}_{1,l}$ и эксцесса $\hat{\gamma}_{2,l}$ распределения активаций:

$$\hat{\gamma}_{1,l} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (a_{i,l} - \bar{a}_l)^3}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (a_{i,l} - \bar{a}_l)^2\right)^{3/2}} \quad \hat{\gamma}_{2,l} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (a_{i,l} - \bar{a}_l)^4}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (a_{i,l} - \bar{a}_l)^2\right)^2} - 3,$$

где $a_{i,l}$ – значения активаций в слое l , $\bar{a}_l$ – выборочное среднее, n – общее количество значений активаций в слое (произведение размера батча (фрагмента набора данных) на количество нейронов). Для каждой эпохи формируются векторы $\Gamma_1 = (\hat{\gamma}_{1,1}, \dots, \hat{\gamma}_{1,L})$ и $\Gamma_2 = (\hat{\gamma}_{2,1}, \dots, \hat{\gamma}_{2,L})$. Коэффициент корреляции Пирсона между ними:

$$\rho = \frac{\sum_{l=1}^L (\hat{\gamma}_{1,l} - \bar{\gamma}_1)(\hat{\gamma}_{2,l} - \bar{\gamma}_2)}{\sqrt{\sum_{l=1}^L (\hat{\gamma}_{1,l} - \bar{\gamma}_1)^2} \sqrt{\sum_{l=1}^L (\hat{\gamma}_{2,l} - \bar{\gamma}_2)^2}},$$

где $\bar{\gamma}_1, \bar{\gamma}_2$ – средние по слоям.

Важно упомянуть, что тепловая карта корреляций, получаемая с помощью разработанного инструмента (рис.1), включает в себя и другие признаки, которые не рассматриваются в рамках настоящей работы. В первую очередь, акцент делается на корреляции между асимметрией (skew) и эксцессом (kurtosis), поэтому для удобства восприятия данные о значениях корреляции между целевыми показателями будут собраны в таблицу 1.

В процессе анализа наблюдается динамика обучения, представленная в качестве примера на рис. 2-7, которая позволяет делать выводы о том, насколько успешно нейросеть подготовлена к выполнению поставленной задачи. В качестве функции потерь используется разреженная категориальная перекрестная энтропия (sparse_categorical_crossentropy), а в качестве основной метрики – разреженная категориальная доля верных ответов (ассурасу). При необходимости оценки на тестовом наборе применяются также F1-мера, точность предсказания положительного класса (precision) и полнота (recall). Для оценки параметров полученной структуры рассматриваются дополнительные графики, отображающие индекс фрустрации (FI) и нормированную сложность по Лемполею-Зиву (LZC) для последовательности активаций скрытого слоя.

Индекс фрустрации для тензора градиентов $G \in \mathbb{R}^{B \times d_1 \times \dots \times d_k}$ (где B – размер батча) рассчитывается, как косинусное расстояние между матрицей норм и скалярных произведений, находимым по сглаженным градиентам каждого батча в вектор (m -количество параметров):

$$G \in \text{flatten}(G[i, :]) \in \mathbb{R}^m, i = 1, \dots, B;$$

$$D_{ij} = g_i \cdot g_j; \quad N_{ij} = \|g_i\| \cdot \|g_j\| + \varepsilon; \quad \cos \theta_{ij} = \frac{D_{ij}}{N_{ij}};$$

$$FI = \frac{1}{B^2} \sum_{ij} (1 - \cos \theta_{ij}).$$

При $FI = 0$ – все градиенты сонаправлены, при $FI = 1$ – градиенты ортогональны, при $FI = 2$ – градиенты противоположны. В контексте нейросетей этот показатель отражает, насколько градиенты конкретного батча смещают параметры сети. Значения FI близкие к 0

говорят о том, что все наборы схоже влияют на обучение, а при $FI > 1$ – о том, что, все примеры влияют противоположно и сеть обучается нестабильно.

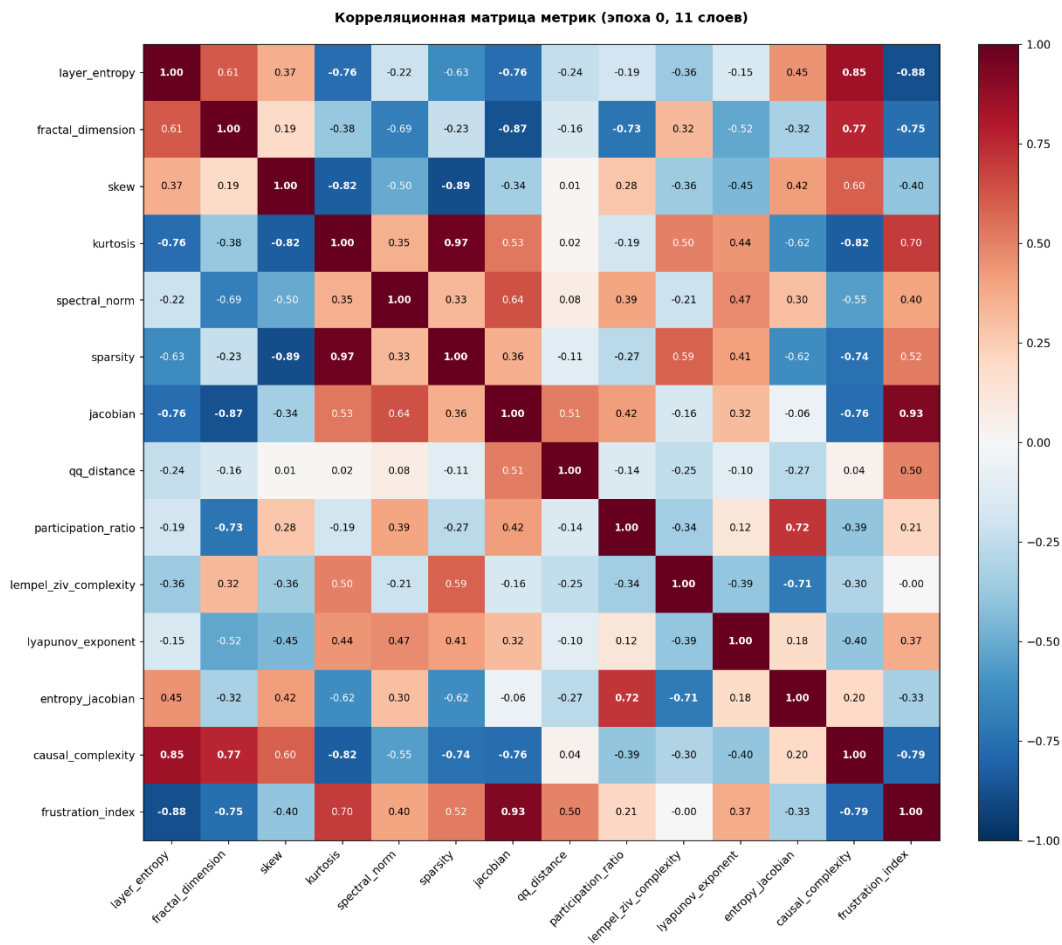


Рис. 1. Тепловая карта корреляции Пирсона для расчётных статистических показателей по активациям нейросети

Нормированная сложность по Лемполою-Зиву для последовательности активаций скрытого слоя для тензора произвольной размерности рассчитывается по бинаризованным по медиане активациям:

$$b_i = \begin{cases} 1, & \text{если } x_i > \text{median}(x), \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Бинарная последовательность упаковывается в биты и байты, а затем полученный массив сжимается алгоритмом zlib и возвращает:

$$LZC = \frac{\text{длина сжатия данных}}{\text{длина исходных байт}}.$$

Если $LZC = 1$, то данные несжимаемы, а если $LZC \ll 1$ данные хорошо сжимаются (низкая сложность, регулярность, избыточность). С помощью этого показателя можно понять, насколько “сложна” последовательность активации с точки зрения алгоритмической информации. Если сложность низкая, то активации содержат много повторяющихся паттернов, структурированы и предсказуемы. В обратном случае, активации хаотичны, непредсказуемы и близки к случайному шуму. В ходе работы также применялись методы искусственного интеллекта.

Ход исследования

Рассмотрим таблицу значений корреляции Пирсона между показателями эксцесса и асимметрии для первой и последней эпох (таблица 1) и сопоставим её с кривыми обучения

(рис. 2-7). Для начала стоит отметить, что корреляция между асимметрией и эксцессом слабо меняется от начала обучения к его завершению. Также, видно, что при отрицательных значениях, кривая обучения более прямая и практически не развивается (рис. 4, 6). При положительных невысоких значениях (рис. 3, 5) обучение имеет динамику, растёт, но часто хаотично меняется и не достигает высокого уровня.

Таблица 1 – Значения корреляции Пирсона между показателями эксцесса и асимметрии

Архитектура	Набор данных	Корреляция. Первая эпоха	Корреляция. Последняя эпоха	Начальная и финальная точность
CNN_light	Wine	0.98	0.98	0.53 – 0.91
	Spine	0.43	0.29	0.68 – 0.80
	Anneal	-0.92	-0.94	0.77 – 0.77
Dense_5	Wine	0.67	0.61	0.53 – 0.77
	Spine	-0.05	-0.18	0.77 – 0.84
	anneal	1.00	0.89	0.68 – 0.98

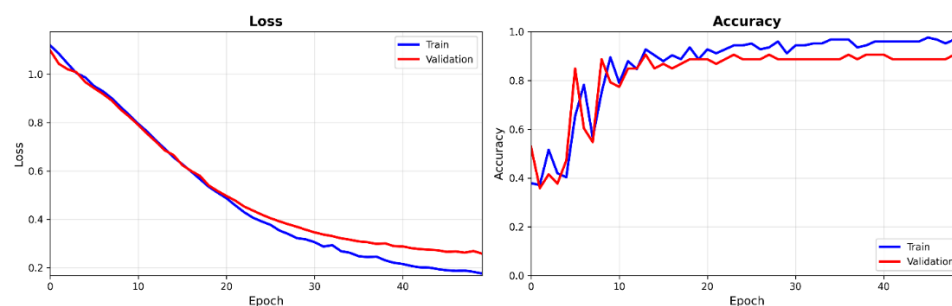


Рис. 2. Кривые обучения CNN_light на наборе данных Wine

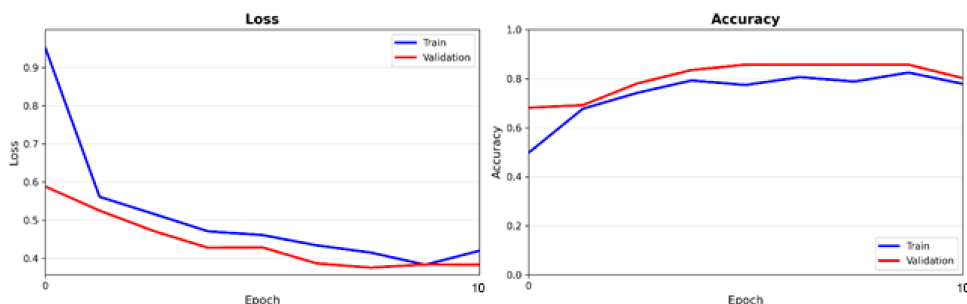


Рис. 3. Кривые обучения CNN_light на наборе данных Spine

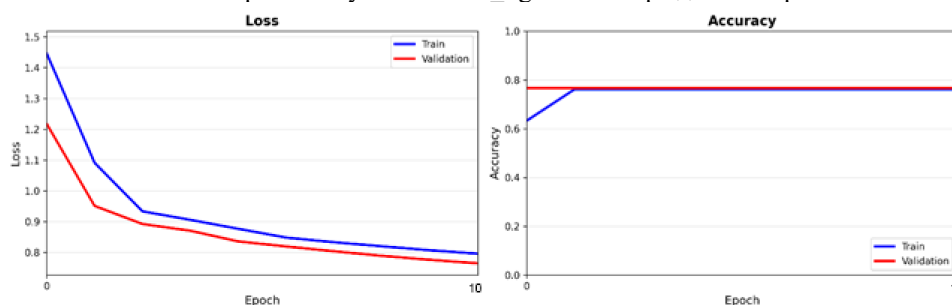


Рис. 4. Кривые обучения CNN_light на наборе данных Anneal

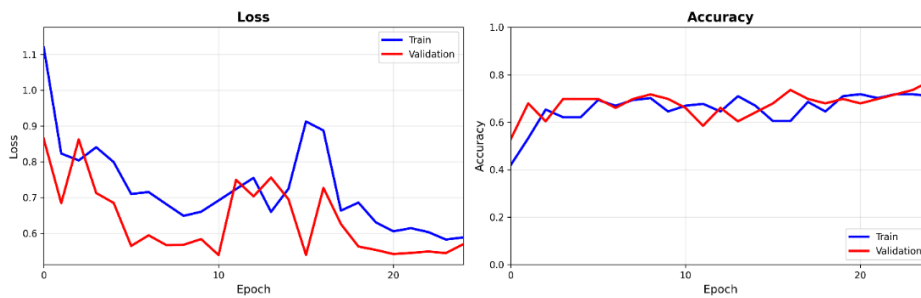


Рис. 5. Кривые обучения Dense_5 на наборе данных Wine

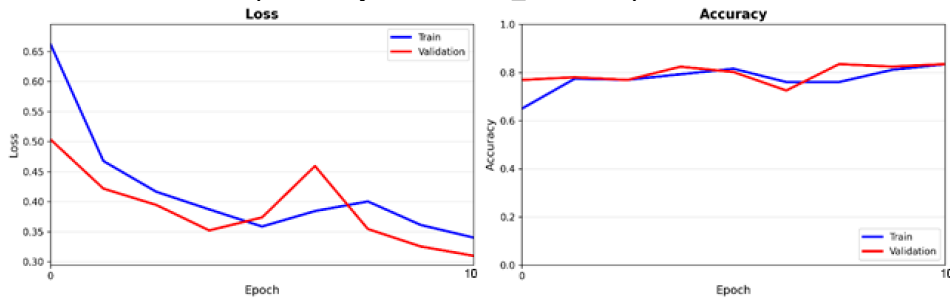


Рис. 6. Кривые обучения Dense_5 на наборе данных Spine

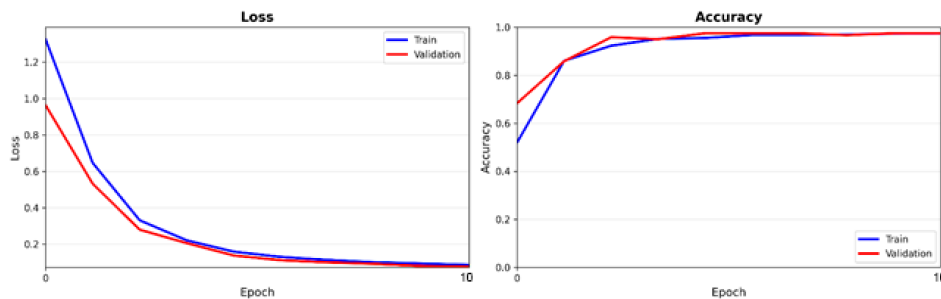


Рис. 7. Кривые обучения Dense_5 на наборе данных Anneal

При высоких положительных значениях, обучение происходит быстро и достигает высоких значений (рис. 2, 7). Это позволяет говорить о том, что характер обучения может быть связан с корреляцией между асимметрией и эксцессом. Отсюда возникает вопрос о согласованности градиентов и сложности модели, динамику которых мы можем отследить по графикам на рис. 8–13.

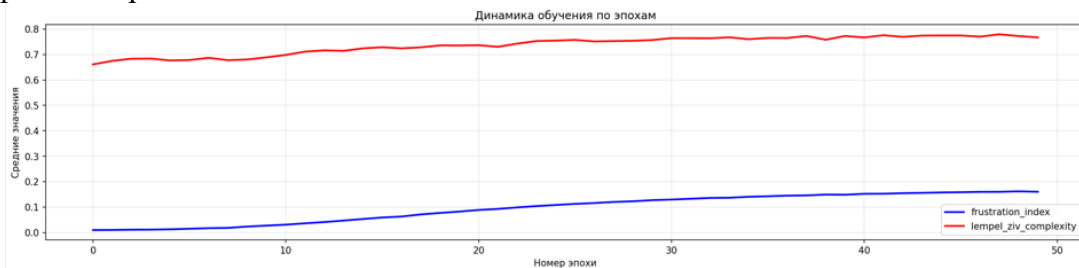


Рис. 8. Динамика индекса фрустрации и сложности для CNN_light на наборе данных Wine

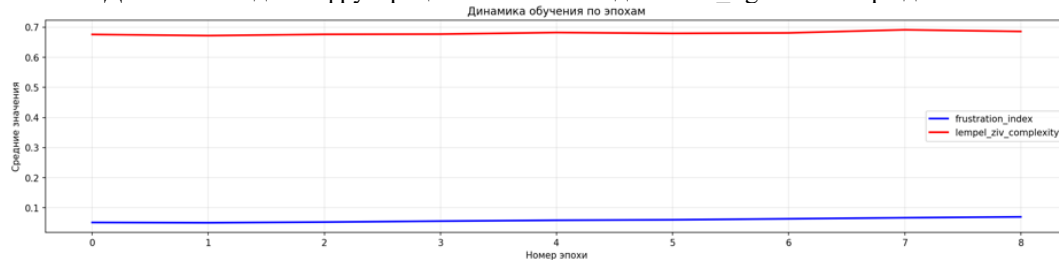


Рис. 9. Динамика индекса фрустрации и сложности для CNN_light на наборе данных spine

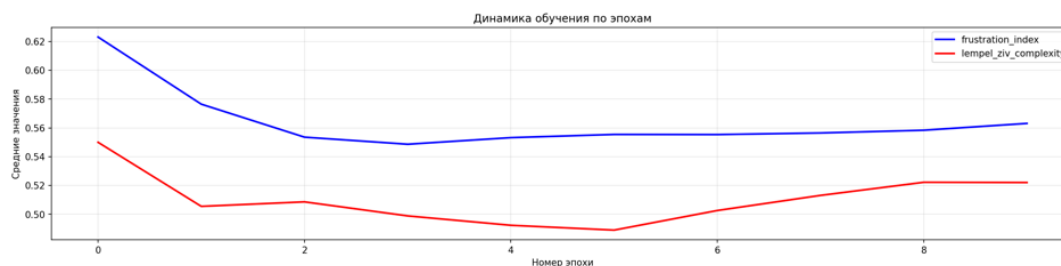


Рис. 10. Динамика индекса фрустрации и сложности для CNN_light на наборе данных anneal



Рис. 11. Динамика индекса фрустрации и сложности для Dense_5 на наборе данных wine

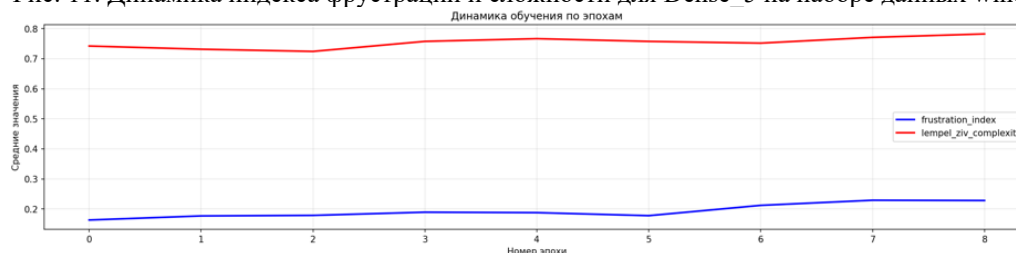


Рис. 12. Динамика индекса фрустрации и сложности для Dense_5 на наборе данных spine

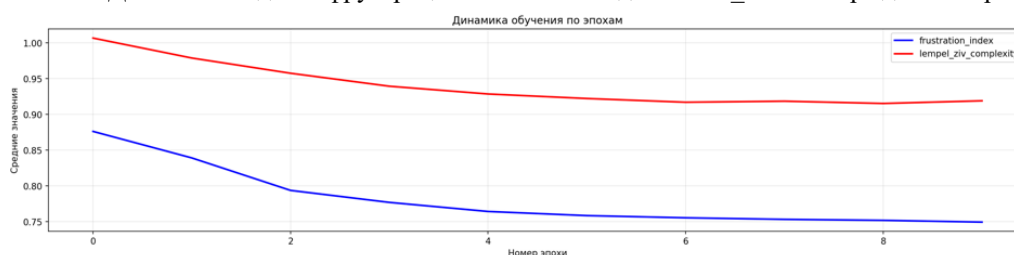


Рис. 13. Динамика индекса фрустрации и сложности для Dense_5 на наборе данных anneal

Динамика IF и LZC показывает, что их характер во многом зависит от архитектуры и слабо зависят от набора данных. Однако, достигнутые уровни этих показателей, представленные в таблице 2, демонстрируют некоторую взаимосвязь с тем, что отмечено ранее. Как видим, динамика dense_5 на наборе anneal показывает очень высокий уровень фрустрации и сложности, что должно говорить о том, что нейросеть учится запоминать данные как шум. Однако детальные метрики при проверке на тестовом наборе (табл. 3) свидетельствуют об обратном.

Таблица 2 – Значения индекса фрустрации и нормированной сложности в начале и в конце обучения

Архитектура	Набор данных	Индекс фрустрации		Нормированная сложность по Лемполю-Зиву		Начальная и конечная точность
		Первая эпоха	Последняя эпоха	Первая эпоха	Последняя эпоха	
CNN_light	Wine	0.01	0.15	0.65	0.78	0.53 – 0.91
	Spine	0.03	0.07	0.68	0.70	0.68 – 0.80
	Anneal	0.62	0.56	0.55	0.52	0.77 – 0.77
Dense_5	Wine	0.05	0.28	0.55	0.63	0.53 – 0.77
	Spine	0.15	0.21	0.74	0.78	0.77 – 0.84
	anneal	0.87	0.75	1.00	0.92	0.68 – 0.98

Таблица 3 – детальные метрики после проверки на тестовой выборке для архитектуры dense_5, обученной на наборе anneal.

Метрика	Accuracy	Precision	Recall	F1-Score
Значение	0.9583	0.9457	0.8892	0.9028

Высокий уровень нормированной сложности по Лемпелю–Зиву соответствует высокой итоговой точности: наибольшая точность достигнута при $LZC > 0,9$ (Dense_5 на Anneal), а наименьшая – при низком LZC (CNN_light на Anneal и Dense_5 на Wine). Низкий индекс фрустрации ($FI < 0,3$) обеспечивает стабильность обучения, но недостаточен для максимальной точности. Высокий уровень FI ($> 0,6$) приводит к двум исходам. В сочетании с высокой сложностью активаций ($LZC > 0,9$) возникает режим, способствующий преодолению локальных минимумов и выходу на высокую точность, как в случае Dense_5 на Anneal (98%). Если же высокая фрустрация сопровождается низким уровнем LZC ($< 0,6$), то обучение заканчивается стагнацией, что демонстрирует CNN_light на Anneal (77%). Таким образом, ключевым условием прорывного обучения в условиях высокой фрустрации выступает достаточная сложность активаций.

Заключение

Проведённые исследования позволяют предположить, что успешное обучение нейросети в задаче классификации возможно тогда и только тогда, когда на первой эпохе корреляция между асимметрией и эксцессом распределения активаций является положительной и высокой, что указывает на “правильную” форму распределения для последующего разделения классов. Средняя положительная корреляция приводит к обучению с возможными флуктуациями, тогда как отрицательная или близкая к нулю свидетельствует о структурной несовместимости архитектуры с данными, при которой обучение либо не начинается, либо быстро останавливается.

Можно предположить, что чем выше сложность активаций по Лемпелю–Зиву, тем выше потенциальная точность при условии, что архитектура способна работать в этом режиме. При этом высокая фрустрация не является препятствием, если архитектура обладает достаточной ёмкостью, чтобы использовать это давление для выхода из локальных минимумов. Напротив, её сочетание с низкой сложностью активаций приводит к “застреванию”. Данные выводы носят характер гипотез и требуют дальнейшей проверки на более широком круге архитектур и наборов данных. Полученные результаты согласуются с современными исследованиями в области анализа внутренних механизмов обучения нейронных сетей.

В [5] показано, что нормированная сложность по Лемпелю–Зиву позволяет количественно оценивать регулярность выходных сигналов нейросети. В настоящем исследовании этот подход расширен применением к активациям скрытых слоёв. Это позволило установить прямую зависимость между уровнем сложности активаций и итоговой точностью классификации.

Концепция конфликтующих градиентов [6] указывает на то, что рассогласованность направлений градиентов дестабилизирует обучение. Полученные результаты не противоречат данному утверждению, однако показывают, что высокая фрустрация ($FI > 0,6$), количественная мера такой рассогласованности, при достаточной сложности активаций ($LZC > 0,9$) не является препятствием, а напротив, создаёт условия для выхода из локальных минимумов и для достижения высокой точности.

Литература

1. Hasan Md. S., Alam R., Adnan M. A. Neuro-Scientific Analysis of Weights in Neural Networks // International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence. – 2021. – Vol. 35, No. 14. – P. 1–36. – DOI: 10.1142/S0218001421520212.
2. Wang Y., Wang Y., Hu G., Liu Y., Zhao Y. Adaptive Skewness Kurtosis Neural Network: Enabling Communication Between Neural Nodes Within a Layer // Neural Information Processing: 27th International

Conference, ICONIP 2020, Bangkok, Thailand, November 18–22, 2020, Proceedings, Part V. – Cham: Springer, 2020. – P. 498–507. – DOI: 10.1007/978-3-030-63823-8_57. – (Communications in Computer and Information Science; Vol. 1333).

3. Kim M., Genton M. G., Huser R., Castruccio S. A neural network-based adaptive cut-off approach to normality testing for dependent data // *Statistics and Computing*. – 2024. – Vol. 35, No. 1. – P. 1–15. – DOI: 10.1007/s11222-024-10551-0.

4. Mas'ud A. A., Stewart B. G. An investigative study on the influence of correlation of PD statistical features on PD pattern recognition // 2018 IEEE 2nd International Conference on Dielectrics (ICD). – Budapest, Hungary: IEEE, 2018. – P. 1–5. – DOI: 10.1109/ICD.2018.8514755.

5. Rudnicka, Z., Szczepanski, J., Pregowska, A. Accuracy-Efficiency Trade-Offs in Spiking Neural Networks: A Lempel-Ziv Complexity Perspective on Learning Rules. 2026. – DOI: 10.48550/arXiv.2506.06750.

6. Yu, T., Kumar, S., Gupta, A., Levine, S., Hausman, K., & Finn, C. Gradient Surgery for Multi-Task Learning. *Advances in Neural Information Processing Systems*, Vol. 33, pp. 5824–5836, 2020. DOI: 10.48550/arXiv.2001.06782.

МОБИЛЬНЫЙ АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АГРО-БЛОК КАК ЭЛЕМЕНТ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ АРКТИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ: ОТ ТРАНСПОРТНОЙ БАЗЫ К ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ

Е.В. Кузюков, студент 2-го курса

А.Р. Мусин, студент 4-го курса

А.В. Блинов, заместитель заведующего кафедрой техники и технологий

*Образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский технологический
университет»
24301055@live.inueco.ru*

Аннотация. В статье рассматривается концепция автономного мобильного агро-блока контейнерного типа, интегрированного в транспортную и энергетическую инфраструктуру полярных станций. Представлены результаты теплотехнического моделирования системы глубокой утилизации тепла дизель-генераторных установок для обогрева вегетационной зоны. Описываются подходы к интеллектуальному управлению микроклиматом на основе мультиагентных систем и цифровых двойников. Проведён сравнительный анализ энергоэффективности современных светодиодных фитосистем.

Введение

Обеспечение жизнедеятельности в Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ) неразрывно связано с задачей продовольственной безопасности и реализацией долгосрочной стратегии освоения региона. Согласно Указу Президента РФ от 26.10.2020 № 645, развитие Арктики является приоритетным направлением государственной политики⁷. В настоящее время снабжение удалённых поселений решается преимущественно за счёт дорогостоящего «северного завоза».

По данным АО «Росатом Арктика», являющегося единым морским оператором северного завоза с 2024 г., стоимость морской перевозки грузов в арктические регионы демонстрирует устойчивый рост: фрахт судов для перевозки ГСМ по маршруту Находка – необорудованный берег в 2024 г. составил 1 млн руб./сутки (рост на 53,8% по сравнению с 2023 г.), а в 2025 г. прогнозируется увеличение до 1,5 млн руб./сутки⁸. С 2021 г. количество судов для перевозки генеральных грузов сократилось на 37,4%, что создаёт системные риски для снабжения. Ежегодно на снабжение заполярных территорий продуктами, лекарствами, топливом и другими товарами направляется 87 млрд рублей, при этом закон о северном завозе (вступил в силу 01.04.2024) направлен на снижение стоимости товаров на 20% за счёт оптимизации логистики⁹.

Гарантированное снабжение качественной свежей продукцией, особенно чувствительной к низким температурам и длительному хранению (овощи, фрукты, зелень), остаётся сложной инженерно-логистической задачей. В связи с этим актуальным становится

⁷ О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года: Указ Президента РФ от 26.10.2020 № 645 // Собрание законодательства РФ. 2020. № 44. Ст. 6875.

⁸ Панов В. Доклад на Восточном экономическом форуме (4 сентября 2024 г.) // Материалы ВЭФ-2024. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/8009591> (дата обращения: 20.02.2026).

⁹ Федеральный закон от 04.08.2023 № 411-ФЗ «О северном завозе» // URL: http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?doc_itself=&backlink=1&nd=605786827&page=1&rdk=0 (дата обращения: 20.02.2026).

развитие контейнерного фермерства – технологий выращивания растений в замкнутой, контролируемой среде непосредственно в местах проживания полярников.

Исследования NASA в рамках проекта HI-SEAS подтверждают, что наличие свежей растительной пищи значительно снижает уровень стресса у персонала в изолированных средах [1]. Международный проект EDEN ISS (European Space Agency), реализованный в Антарктиде в 2018 г., продемонстрировал возможность автономного выращивания овощей в течение 9 месяцев с получением 270 кг продукции для экипажа из 10 человек [2]. Однако внедрение традиционных теплиц в Арктике сдерживается высокой энергоёмкостью процессов отопления и освещения: по данным исследований, контейнерные фермы потребляют в 30 раз больше энергии на килограмм продукции по сравнению с традиционным земледелием [3].

Данная работа посвящена разработке концепции мобильного агро-блока, который решает эти проблемы за счёт интеграции с транспортными платформами высокой проходимости и энергетическими системами станций.

Исследование проводилось методом системного анализа и математического моделирования тепловых процессов. Для обоснования концепции использованы:

- теплотехнический расчёт – методика оценки теплотерь ограждающих конструкций контейнера и баланса тепловыделений оборудования согласно СП 131.13330.2020 «Строительная климатология и геофизика»¹⁰;
- энергетический анализ – расчёт эффективности утилизации тепла ДГУ на основе данных о распределении энергии в дизельном двигателе: 30–35% – полезная механическая работа, 30% – тепло выхлопных газов, 30% – тепло охлаждающей жидкости [4];
- сравнительный анализ – оценка эффективности светодиодных фитосистем по критерию фотонной эффективности (PPE, мкмоль/Дж) на основе экспериментальных данных 2024 г. [5];
- моделирование управления – разработка архитектуры мультиагентной системы (MAC) с применением стандартов FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agents) [6].

Концепция мобильного агро-блока и его энергетическая эффективность

Для обеспечения мобильности и возможности оперативной переброски ресурсов между станциями перспективным решением является размещение агро-блока в теплоизолированном контейнере на базе высокопроходимой гусеничной платформы.

В качестве транспортной базы предложены сочлененные гусеничные транспортеры семейства «Витязь» (ДТ-30, ДТ-30П, ДТ-30ПМ). Технические характеристики ДТ-30ПМ¹¹:

- грузоподъёмность: 30 т
- масса в снаряжённом состоянии: 29 т
- мощность двигателя: 588 кВт (800 л.с.)
- рабочий диапазон температур: от –50 °С до +40 °С
- удельное давление на грунт: 0,3 кг/см² (ниже давления стопы человека)
- преодолеваемый ров: до 4 м

Данные машины способны работать при температурах до –50 °С, преодолевая снежную целину, торосы и водные преграды. Грузоподъёмность платформ позволяет транспортировать агро-блок весом до 20 тонн с запасом расходных материалов (субстрат, семена, удобрения) на длительный период автономной работы.

Модульный принцип построения, аналогичный применённому в зимовочном комплексе станции «Восток», позволяет быстро интегрировать агро-блок в существующую

¹⁰ СП 131.13330.2020 СНиП 23-01-99*. Строительная климатология и геофизика. М.: Стандартинформ, 2021. 128 с.

¹¹ Двухзвенный гусеничный транспортер ДТ-30П «Витязь» // Официальный сайт ОАО «Завод транспортной техники». URL: <https://vityaz.atvgroup.ru> (дата обращения: 20.02.2026).

инфраструктуру. Контейнерное исполнение обеспечивает стандартные габариты для транспортировки морским, железнодорожным и авиационным транспортом.

Внутреннее пространство оптимизировано для вертикального фермерства с использованием многоярусных стеллажей с аэропонными системами. Плотность посадки при вертикальном расположении увеличивается в 3–5 раз по сравнению с традиционным грунтовым выращиванием [9], что критически важно в условиях ограниченного пространства.

Ключевым инженерным вызовом для арктического контейнерного фермерства является высокая энергоёмкость освещения и отопления, составляющая до 50% себестоимости продукции [3]. В условиях, когда каждый киловатт-час электроэнергии получен за счёт сжигания привозного дизельного топлива, эффективность энергопотребления становится определяющим фактором жизнеспособности проекта.

Расчёт теплопотерь контейнера (габариты 12×2,5×2,9 м, утепление 200 мм вакуумными панелями):

Теплопотери через ограждения при температуре наружного воздуха –40 °С и внутренней +22 °С:

$$Q_{\text{потерь}} = k \cdot F \cdot \Delta t$$

где k – приведённый коэффициент теплопередачи (для вакуумной изоляции 0,15 Вт/(м²·°С));

F – площадь ограждающих конструкций (141 м²);

Δt – разность температур (62 °С);

$$Q_{\text{потерь}} = 0,15 \cdot 141 \cdot 62 = 1311 \text{ Вт}$$

При учёте инфильтрации (коэффициент 1,3) общие теплопотери составляют 1704 Вт (≈1,7 кВт).

На современных станциях для отопления жилых модулей применяются комплексы утилизации тепла от дизель-генераторов. Дизельный двигатель выделяет [8]:

- 30% энергии топлива – через выхлопные газы (температура 400–600 °С)
- 30% – через систему охлаждения (температура 80–95 °С)
- 35% – полезная механическая работа
- 5% – прочие потери

Интеграция агро-блока в тепловой контур ДГУ позволяет минимизировать затраты на обогрев. Теплоноситель (пропиленгликоль 40%) циркулирует через теплообменники:

1. Выхлопной теплообменник – рекуперация тепла выхлопных газов (до 60% доступного тепла)

2. Конденсатор – тепло от охлаждения двигателя

Суммарная мощность утилизируемого тепла для ДГУ 500 кВт:

– Тепло выхлопных газов: $500 \cdot 0,3 \cdot 0,6 = 90$ кВт

– Тепло охлаждения: $500 \cdot 0,3 = 150$ кВт

– Доступно для агро-блока: 15–20 кВт (с учётом потерь и приоритета жилых модулей)

Этого достаточно для компенсации теплопотерь контейнера (1,7 кВт) и обогрева субстрата.

Современные светодиодные фитосистемы характеризуются высокой фотонной эффективностью (PPE). По данным исследований 2024 г. [9]:

- Красные диоды (660 нм): до 3,84 мкмоль/Дж
- Дальний красный (730 нм): до 3,39 мкмоль/Дж
- Синие диоды (450 нм): до 2,38 мкмоль/Дж
- Белые диоды (5700 К): до 2,31 мкмоль/Дж

При этом КПД преобразования электроэнергии в тепло составляет 60–70% (для диодов с PPE 2,9 мкмоль/Дж). В условиях Арктики это тепло является полезным для поддержания микроклимата.

Расчёт энергобаланса освещения:

Для площади посадки 50 м² (5 ярусов по 10 м²) при требуемой PPFD 250 мкмоль/(м²·с) и световом дне 16 ч:

$$E_{\text{потребления}} = \frac{PPFD \cdot S \cdot t}{PPE} = \frac{250 \cdot 50 \cdot 57600}{2,9 \cdot 10^6} = 248 \text{ кВт} \cdot \text{ч/сутки}$$

где $E_{\text{потребления}}$ – суточное энергопотребление системы освещения агро-блока, измеряемое в кВт·ч/сутки;

PPFD – плотность фотосинтетического фотонного потока ($\frac{250 \text{ мкмоль}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$), необходимая для нормального роста растений;

S – общая площадь посадки (50 м²), которая в данном проекте складывается из 5 ярусов по 10 м²;

t – продолжительность светового дня, переведённая в секунды (16 ч. × 3600 с. = 57600 с.);

PPE – фотонная эффективность светодиодных фитосистем (2,9 мкмоль/Дж), определяющая качество преобразования энергии в свет для фотосинтеза;

Тепловыделение от светильников: 248·0,65=161 кВт·ч/сутки (≈6,7 кВт средней мощности), что покрывает потребности в отоплении с избытком.

Дополнение системы солнечными панелями актуально в полярный день. При инсоляции 400 Вт/м² (среднее для арктического лета) и площади панелей 20 м² (КПД 20%):

$$P_{\text{солнечной}} = 400 \cdot 20 \cdot 0,2 = 1,6 \text{ кВт}$$

Накопители энергии (литий-ионные батареи) позволяют сглаживать пики потребления. В перспективе рассматривается использование водорода, полученного методом электролиза в период избыточной генерации.

Интеллектуальное автоматическое управление

Для минимизации ручного труда и исключения ошибок персонала управление агро-блоком осуществляется автоматически. Архитектура системы управления строится на взаимодействии автономных программных агентов [10]:

- Агент «Климат» – контроль температуры, влажности, CO₂
- Агент «Свет» – управление фотопериодом и спектром
- Агент «Тепло» – регулирование теплообмена с ДГУ
- Агент «Ирригация» – контроль pH, ЕС, влажности субстрата
- Агент «Энергия» – мониторинг доступной мощности
- Агенты ведут «переговоры» для оптимального распределения ограниченных ресурсов. Например, при снижении доступной мощности агент «Энергия» сигнализирует агенту «Свет» о переходе на режим пониженной интенсивности (достаточный для поддержания фотосинтеза, но не оптимальный для роста), а агент «Климат» снижает интенсивность вентиляции.

Создание виртуальной модели агро-блока позволяет [10]:

- Прогнозировать время сбора урожая на основе моделей роста растений
- Диагностировать износ оборудования до наступления отказа
- Тестировать режимы выращивания в облачных сервисах (Digital Twin) до их применения на практике
- Оптимизировать энергопотребление через предиктивную аналитику

Цифровой двойник накапливает данные о росте растений в зависимости от параметров среды, создавая базу знаний для оптимизации будущих циклов. Это особенно важно для Арктики, где цена ошибки (потеря урожая) крайне высока из-за длительности логистического плеча замены семян (6–12 месяцев).

Использование легковесных протоколов (MQTT, CoAP) обеспечивает надёжную передачу данных от датчиков при нестабильных каналах связи (спутниковый канал с задержкой 500–800 мс). Локальный контроллер (PLC) работает автономно, сохраняя данные

в буфере и синхронизируясь с центральным сервером при появлении устойчивого соединения [11].

В настоящее время существуют прототипы роботизированных теплиц для Арктики, подтверждающие техническую реализуемость концепции:

Томский политехнический университет – разработан исследовательский комплекс «Фитотрон» с управлением спектрально-энергетическими характеристиками облучения (красные, синие и белые светодиоды с регулируемым током 0–700 мА) [13].

Проект «АгроПолигон» (МГУ) – исследования в области замкнутых систем жизнеобеспечения.

Отличие предлагаемого решения – глубокая интеграция с энергосистемой станции через утилизацию тепла ДГУ и использование отечественной транспортной базы («Витязь»), обеспечивающей технологический суверенитет.

Выводы

Проведённые расчёты показывают, что интеграция агро-блока с системой утилизации тепла ДГУ позволяет снизить энергопотребление на отопление на 85–90% по сравнению с автономным электрическим обогревом. При этом:

- Теплотеплопотери контейнера: 1,7 кВт
- Доступное тепло от ДГУ: 15–20 кВт (при условии приоритета жилых модулей)
- Тепловыделение от освещения: 6,7 кВт

Энергетический баланс положительный даже при экстремальных температурах (–50°C), при этом сохраняется резерв мощности для быстрого прогрева системы после транспортировки.

Предварительная оценка себестоимости продукции (при условии интеграции с ДГУ):

– Электроэнергия на освещение: $248 \text{ кВт} \cdot \text{ч/сутки} \times 365 \text{ дней} \times 15 \text{ руб./кВт} \cdot \text{ч} = 1,36 \text{ млн руб./год}$

– Тепло: 0 руб. (утилизация от ДГУ)

– Субстрат и семена: 150 тыс. руб./год

– Амортизация оборудования: 300 тыс. руб./год

Итого: $\approx 1,8 \text{ млн руб./год}$ при урожайности 200–300 кг зелени и 50–80 кг овощей. Стоимость 1 кг продукции: 6000–7200 руб., что сопоставимо с логистическими издержками доставки свежих овощей в арктические станции (5000–15000 руб./кг в зимний период).

Ограничения и риски:

– Зависимость от ДГУ – при остановке генераторов требуется резервное электрическое отопление (мощность 5 кВт).

– Квалификация персонала – необходимость подготовки операторов для работы с мультиагентными системами.

Разработка мобильного агро-блока является перспективным направлением, объединяющим достижения в области транспортного машиностроения, теплоэнергетики и искусственного интеллекта. Реализация данной концепции отвечает стратегическим задачам освоения Арктики и повышения качества жизни персонала в высоких широтах.

Научная новизна заключается в комплексном подходе к интеграции контейнерного фермерства с энергетической системой полярной станции через глубокую утилизацию тепла ДГУ, что позволяет достичь энергетической эффективности, недостижимой для автономных систем.

Практическая значимость подтверждена теплотехническими расчётами, демонстрирующими возможность поддержания микроклимата при температурах наружного воздуха до –50 °C без дополнительных энергозатрат на отопление.

Литература

1. NASA Human Research Program. Evidence Report: Risk of Performance and Team Failures Due to Inadequate Cooperation, Coordination, Communication, and Psychosocial Adaptation within a Team. Houston: NASA, 2015. 142 p.

2. Zabel P., Bamsey M., Schubert D., Tajmar M. Biomass Production of the EDEN ISS Space Greenhouse in Antarctica During the 2018 Experiment Phase // *Frontiers in Plant Science*. 2020. Vol. 11. P. 656. DOI: 10.3389/fpls.2020.00656.
3. Van Ginkel S.W., Igou T., Broussard J., Merkle S., McDonald M., Hernandez R. et al. Implementing Vertical Farming at University Scale to Promote Sustainable Design Education // *Sustainability*. 2017. Vol. 9(9). P. 1558. DOI: 10.3390/su9091558.
4. Kabeyi M.J.B., Oludolapo A.O. Performance analysis of diesel engine heat pump with heat recovery for water heating // *Energy Reports*. 2020. Vol. 6. P. 2308–2324. DOI: 10.1016/j.egy.2020.08.010.
5. Li X., Zhang Y., Li Y., Yang C. Photon efficacy and cost investigation of LEDs at different wavelengths and color temperatures for horticulture // *Discover Applied Sciences*. 2024. Vol. 6(1). P. 137. DOI: 10.1007/s44279-024-00137-9.
6. Foundation for Intelligent Physical Agents. FIPA Specifications. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/773093> (дата обращения: 20.02.2026).
8. Филин П. А. Повседневная жизнь полярников в Арктике и Антарктике: опыт сопоставления // *Этнография*. 2024. №4 (26). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povsednevnyaya-zhizn-polyarnikov-v-arktike-i-antarktike-opyt-sopostavleniya> (дата обращения: 20.02.2026).
9. Benke K., Tomkins B. Future food-production systems: vertical farming and controlled-environment agriculture // *Sustainability: Science, Practice and Policy*. 2017. Vol. 13(1). P. 13–26.
10. Wolfert S., Ge L., Verdouw C., Bogaardt M.-J. Big Data in Smart Farming—A review // *Agricultural Systems*. 2017. Vol. 153. P. 69–80.
11. Кузнецов И.И. Протоколы IoT для спутниковой связи в удаленных регионах // *Т-Коммунал*. 2022. № 10. С. 45–50.
12. The Arctic as a Food Producing Region // URL: <https://oaarchive.arctic-council.org/server/api/core/bitstreams/6ed6f5bf-e15f-4d11-b5ab-72cfbd44603c/content> (дата обращения: 20.02.2026).
13. Сурнина Е.Н. Разработка методики проектирования энергоэффективных светодиодных облучателей для тепличного растениеводства: дис. канд. техн. наук. Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2024. 185 с.

РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ТРАНСПОРТНОГО ПРОЦЕССА НА ВНУТРЕННИХ ВОДНЫХ ПУТЯХ

А.С. Прокопенко¹, аспирант

¹ *Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород*
a.prokopenko@internet.ru

Аннотация. В работе представлена разработка прототипа имитационной модели транспортного процесса на внутренних водных путях, реализованной на основе дискретно-событийного подхода. Модель описывает формирование заявок на перевозку, распределение судов, движение по маршрутам и обработку грузов в портах с учетом ограничений инфраструктуры. Моделирование основано на данных, для которых разработаны структура и схема хранения. Проведены вычислительные эксперименты, позволившие оценить загрузку системы, простои судов и эффективность перевозок. Сделан вывод о применимости модели для поддержки управленческих решений.

Введение

Внутренние водные пути являются важным элементом транспортной системы, обеспечивающим перевозку значительных объемов грузов при относительно низких затратах. Эффективность функционирования данного вида транспорта во многом определяется согласованностью работы судов и объектов инфраструктуры, таких как порты и гидротехнические сооружения, а также качеством диспетчерского управления. В условиях возрастающей сложности логистических процессов и ограниченности ресурсов возникает необходимость применения современных методов анализа и поддержки принятия решений [1].

Одним из наиболее эффективных инструментов исследования транспортных систем является имитационное моделирование, позволяющее учитывать стохастический характер процессов, ресурсные ограничения и динамику взаимодействия элементов системы. В частности, дискретно-событийный подход обеспечивает детальное описание последовательности операций во времени без необходимости использования трудоемких непрерывных моделей [2].

Целью данной работы является разработка имитационной модели транспортного процесса на внутренних водных путях и её программной реализации, позволяющей проводить вычислительные эксперименты и анализировать эффективность функционирования системы. В рамках исследования решаются задачи построения архитектуры модели, разработки алгоритмов управления потоками судов и грузов, а также организации хранения и обработки исходных данных. Особое внимание уделяется созданию гибкой программной системы, основанной на использовании базы данных для задания структуры транспортной сети, параметров судов и логистических процессов. Такой подход обеспечивает возможность адаптации модели к различным сценариям эксплуатации без изменения программного кода. Практическая значимость работы заключается в возможности использования разработанной модели в качестве инструмента анализа и поддержки управленческих решений при организации перевозок на внутренних водных путях.

Обзор подходов к моделированию транспортных процессов

Моделирование транспортных систем является важным инструментом анализа и оптимизации логистических процессов. В научной практике применяется несколько основных подходов, различающихся по уровню детализации, типу используемых моделей и области применения.

Одним из традиционных подходов является аналитическое моделирование, основанное на методах теории массового обслуживания, математического программирования и теории графов. Такие модели позволяют получать обобщённые характеристики функционирования транспортных систем, однако их применение ограничено сложностью учета случайных факторов и динамического взаимодействия элементов [3].

В настоящее время широкое распространение получило имитационное моделирование, позволяющее воспроизводить поведение транспортной системы во времени с учетом стохастических параметров и ресурсных ограничений. Наиболее эффективным является дискретно-событийный подход, при котором система описывается как последовательность событий, изменяющих её состояние. Данный подход активно применяется при моделировании логистических процессов и транспортных операций [4].

Также используется агентное моделирование, в рамках которого элементы системы рассматриваются как автономные агенты, принимающие решения на основе заданных правил. Такой подход позволяет учитывать сложные взаимодействия между участниками транспортного процесса, однако требует значительных вычислительных ресурсов и детальной настройки модели [5].

Для описания транспортных сетей широко применяется графовый подход, в котором транспортная система представляется в виде ориентированного графа, где вершины соответствуют объектам инфраструктуры, а рёбра – участкам маршрутов. На основе графовых моделей решаются задачи маршрутизации, распределения потоков и оценки пропускной способности сети [6].

Моделирование транспортных процессов на внутренних водных путях имеет ряд особенностей, связанных с учетом гидрологических условий, ограничений инфраструктуры и специфики организации перевозок. Это обуславливает необходимость применения имитационного моделирования, позволяющего комплексно учитывать перечисленные факторы в рамках единой модели.

Дополнительно к существующим подходам в практике управления перевозками на внутренних водных путях широко применяется нормативный метод планирования и прогнозирования [7]. Он основан на использовании установленных норм и показателей (пропускной способности участков, времени обработки судов, нормативной загрузки флота), что позволяет формировать укрупнённые планы перевозок и оценивать потребности в ресурсах. К преимуществам данного подхода относятся простота применения, наглядность результатов и возможность быстрого получения оценок без сложных вычислений. Однако его существенным недостатком является ограниченная точность, обусловленная игнорированием стохастической природы транспортных процессов, неравномерности поступления заявок и влияния случайных факторов. В результате это может приводить к возникновению скрытых «узких мест», увеличению простоев судов и неэффективному использованию инфраструктуры. Указанные ограничения обуславливают необходимость применения более гибких методов, таких как имитационное моделирование, позволяющее учитывать динамику и неопределенность транспортной системы.

Анализ существующих подходов показывает, что для исследования сложных транспортных систем наиболее целесообразно применение дискретно-событийного имитационного моделирования, что и определяет выбор метода в данной работе.

Организация и хранение данных

В разработанной системе особое внимание уделено организации хранения и обработки исходных данных, обеспечивающих настройку и функционирование имитационной модели. В качестве основного инструмента хранения используется реляционная база данных SQLite, позволяющая задавать структуру транспортной сети, параметры объектов и сценарии моделирования без изменения программного кода. Был также разработан скрипт, который переводит csv таблицы в формат SQLite.

Доступ к данным реализован через слой абстракции, включающий менеджер данных и набор репозитория, соответствующих отдельным сущностям предметной области. Для разработки данной абстракции использовался подход объектно-реляционного отображения (ORM) [8]. Он обеспечивает разделение логики моделирования и работы с данными, а также упрощает расширение и модификацию системы. Каждый тип сущностей (суда, локации, участки водных путей, транспортные задачи) представлен в виде отдельного репозитория, отвечающего за загрузку, хранение и предоставление данных в модель.

Структура базы данных построена с учетом специфики транспортного процесса и включает взаимосвязанные таблицы, описывающие элементы системы. Таблица локаций содержит информацию об объектах инфраструктуры (порты, гидротехнические сооружения и другие узлы), таблица водных путей определяет топологию сети и связи между участками, таблицы судов и проектов судов задают технические характеристики флота. Логистические процессы описываются через таблицы грузопотоков и операций, определяющие объемы перевозок, направления и последовательность выполнения действий. Дополнительно используется таблица задач, связывающая суда с конкретными грузопотоками и начальными условиями моделирования.

Важной особенностью является возможность задания различных сценариев моделирования путем изменения содержимого базы данных. Это позволяет исследовать влияние параметров транспортной системы, таких как состав флота, структура сети или характеристики грузопотоков, без необходимости изменения алгоритмической части модели.

Подготовка исходных данных осуществляется с использованием внешних форматов, в частности CSV, с последующей загрузкой в базу данных. Такой подход упрощает формирование тестовых и экспериментальных сценариев, а также обеспечивает интеграцию с внешними источниками данных.

Разработанная система хранения данных обеспечивает гибкость настройки модели и удобство масштабирования, что является важным условием для проведения исследований транспортных процессов.

Описание имитационной модели

Разработанная имитационная модель транспортного процесса на внутренних водных путях основана на дискретно-событийном подходе, при котором система представляется как последовательность событий, изменяющих её состояние во времени. Модель учитывает структуру транспортной сети, ограничения инфраструктуры и условия выполнения перевозок.

Ключевой особенностью модели является многоуровневое представление транспортной сети. На базовом уровне используется граф водных путей, представляющий собой неориентированный граф $G_w = (V_w, E_w)$, где вершины соответствуют участкам водной сети, а рёбра отражают физическую связность участков (например, устья, каналы, моря озёра). Данный граф описывает топологию водных путей без учета направленности движения.

На основе графа водных путей формируется граф пунктов $G_l = (V_l, E_l)$, отражающий реальные точки взаимодействия транспортного процесса (порты, шлюзы, перевалочные узлы и т.д.). В отличие от базового графа, граф пунктов является ориентированным для участков рек, что позволяет учитывать влияние течения на направление и скорость движения судов. Для участков, соответствующих морским или озёрным акваториям, сохраняется двунаправленная связность, что отражает отсутствие выраженного направления течения. Такой подход позволяет более точно моделировать условия движения и ограничения, накладываемые различными типами водных путей.

Динамика транспортного процесса описывается через систему дискретных событий, включающих прибытие судна в пункт на водном пути, начало выполнения операции, завершение операции и отправление к следующему пункту маршрута. Управление ходом

моделирования осуществляется с использованием календаря событий, реализованного в виде очереди с приоритетом, упорядоченной по времени наступления событий.

Маршрутизация судов выполняется на основе графа пунктов, который учитывает как топологию сети, так и направленность движения. Это позволяет строить корректные маршруты с учетом гидрологических условий и ограничений на отдельных участках сети.

В модели реализован механизм учета ограниченности ресурсов инфраструктуры. Каждый объект характеризуется пропускной способностью, определяющей максимально допустимое количество одновременно обслуживаемых судов, а также есть возможность задавать ограничения по типам грузов, их объему и т.д. При превышении доступной емкости формируются очереди на обслуживание, организованные по принципу FIFO, что обеспечивает корректное моделирование конкуренции за ресурсы.

Дополнительно учитывается условие доступности грузов для выполнения перевозок. Судно может приступить к операции только при наличии необходимого объема груза в соответствующей локации. В противном случае оно переходит в состояние ожидания до момента выполнения данного условия, после чего инициируется повторная проверка возможности начала операции.

Отдельной задачей является определение целесообразности возврата судна в исходный пункт после выполнения перевозки. В условиях, когда отдельные процессы формирования и потребления грузов не обладают информацией друг о друге, возникает риск неэффективных перемещений, связанных с отсутствием груза в точке назначения. Для решения данной проблемы в модели реализован механизм глобального учета состояния грузопотоков, позволяющий отслеживать суммарные объемы произведенного, перевезенного и оставшегося к обработке груза. На основе этих данных принимается решение о возможности дальнейшего обслуживания конкретного направления. В случае, если ожидаемый объем груза исчерпан, судно не возвращается в исходную локацию, а может быть перенаправлено или завершает выполнение задачи. Такой подход позволяет избежать избыточных холостых перемещений и повысить общую эффективность транспортного процесса. В будущем данный механизм может быть замещен на интерактивный формат, когда диспетчер определяет действия судна после выполнения своего изначального маршрута.

Предложенная модель сочетает графовое представление транспортной сети с дискретно-событийным описанием процессов и позволяет учитывать особенности различных типов водных путей, направленность движения и ресурсные ограничения, обеспечивая адекватное воспроизведение транспортного процесса.

Методы исследования

В процессе подготовки данной статьи и разработки модели использовались инструменты искусственного интеллекта. Для формирования текста статьи применялись ChatGPT и Gemini 3 Flash, что позволило ускорить структурирование материалов и формулировку разделов. Для реализации программного кода на языке C++ 20 и Python3 использовался ИИ-агент Junie, который помог генерировать функции, шаблоны и алгоритмы моделирования. Все решения, предложенные ИИ, были проверены и доработаны автором, а итоговый текст и код отражают авторскую интерпретацию и корректировку предложенных вариантов.

Разработанная имитационная модель сочетает дискретно-событийное управление процессами с графовым представлением транспортной сети и позволяет проводить вычислительные эксперименты для анализа эффективности перевозок.

Для упрощения и отладки работы модели условия движения судов не учитывались. На начальном этапе берутся фиксированные значения времени перемещения между различными локациями, времени погрузки/разгрузки судна и сопутствующих операций, а также время на шлюзование.

При проведении вычислительного эксперимента модель настраивается через базу данных SQLite, позволяя изменять состав флота, параметры водной сети и сценарии грузопотоков без модификации кода. Результаты фиксируются через статистический модуль, который собирает информацию о маршрутах, времени простоя, обработанных объемах грузов и эффективности использования ресурсов. Такой подход обеспечивает проверку различных сценариев работы системы, позволяет выявлять узкие места и оценивать влияние изменений на общую производительность перевозок.

Структура параметризации модели: задаются грузопотоки и процессы, которые обслуживают данные грузопотоки; задаются конкретные суда, их начальные дислокации. Суда назначаются на процесс, принадлежащий определенному грузопотоку.

Для оценки работы разработанной модели был проведен вычислительный эксперимент с двумя грузопотоками: из портов Самары и Уфы в порт Кавказ, с объемами 50 000 и 115 000 тонн соответственно. Для каждого грузопотока были определены процессы с последовательностью операций в портах и на узлах сети, а также назначены конкретные суда с начальными дислокациями. Результаты вычислительного эксперимента представлены на рис. 1.

```

===== Simulation Statistics (Task-based) =====
Total modeling time: 14312.5 (from 0 to 14312.5)
Total cargo moved: 165000 / 165000 (All cargo moved within time limit)
TaskID  InitLoc  CurrLoc  RoutesN  TimeOnR  CargoMoved  LocksN  WaitTime | RouteName
-----
1       САМАРА  САМАРА    3        1596     12600       108      0 | САМАРА -> ВДШ-16
2       САРАТОВ  САМАРА    3        1596     12600       108      0 | САМАРА -> ВДШ-16
3       КАВКАЗ  КАВКАЗ    0       14252.5      0          2      0 | ВДШ-16 -> КАВКАЗ
4       ВДШ-16   КАВКАЗ    6        1767     25200       22     0.5 | ВДШ-16 -> КАВКАЗ
5       САМАРА  КАВКАЗ    3       1796.5     12600       100      0 | САМАРА -> КАВКАЗ
6       АЗОВ     КАВКАЗ    3       1796.5     12200       100      0 | САМАРА -> КАВКАЗ
7       УФА      АКТАНЬШ   39        1251    115000        0      0 | УФА -> АКТАНЬШ
8       АКТАНЬШ  ВДШ-16    20       14311     58000       780      0 | АКТАНЬШ -> ВДШ-16
9       УФА      АКТАНЬШ   19     13595.5     57000       760     32 | АКТАНЬШ -> ВДШ-16
=====
Simulation completed successfully.

```

Рис. 1. Результаты работы модели.

Эксперимент показал, что система корректно распределяет задачи между судами, обеспечивает последовательное выполнение операций и учитывает очередность обслуживания ресурсов. Общий объем перевезенного груза составил 165 000 тонн, что свидетельствует о полной обработке всех задач за 14312,5 единиц условных единиц времени.

Заключение

Разработанная дискретно-событийная модель транспортного процесса на внутренних водных путях демонстрирует возможность эффективного анализа и планирования перевозок с учетом ограничений инфраструктуры, последовательности операций и синхронизации грузопотоков. Использование графовой структуры сети и событийной логики позволяет моделировать движение судов, очередность обслуживания портов и шлюзов, а также учитывать доступность грузов в узлах сети.

Вычислительный эксперимент показал, что модель корректно распределяет задачи между судами, а также позволяет оценивать эффективность использования транспортного флота и инфраструктуры. Полученные результаты подтверждают практическую значимость модели для планирования перевозок, выявления узких мест и оптимизации логистических процессов.

Дальнейшее развитие модели предусматривает замену фиксированных значений времени перемещения и операций на установленные нормы, а также реализацию полноценного моделирования ходовой операции судов. Эти усовершенствования позволят повысить точность прогнозов и расширят возможности анализа сложных сценариев работы

транспортной системы, обеспечивая поддержку принятия решений в логистике внутренних водных путей.

Литература

1. Григорьев Е. А. Внутренний водный транспорт России: проблемы, перспективы развития, влияние глобализации // Экономика: теория и практика. 2019. № 3 (55). С. 27–30.
2. Гуменюк Н. С., Халикова Е. С. Применение имитационного моделирования для анализа работы транспортных систем // Успехи современного естествознания. 2011. № 7. С. 101–101. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=27084> (дата обращения: 09.04.2026).
3. Бочаров П. П., Печинкин А. В. Теория массового обслуживания. М.: Изд-во РУДН, 1995. 529 с.
4. Масликова Т. Е., Редько С. Г. Применение подходов имитационного моделирования для оценки эффективности логистических процессов // Глобальная энергия. 2013. № 4-2 (183). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-podhodov-imitatsionnogo-modelirovaniya-dlya-otsenki-effektivnosti-logisticheskikh-protsessov> (дата обращения: 09.04.2026).
5. Арский А. А. Агентное моделирование в управлении отраслевыми логистическими системами // Вестник МФЮА. 2023. № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/agentnoe-modelirovanie-v-upravlenii-otraslevymi-logisticheskimi-sistemami> (дата обращения: 09.04.2026).
6. Черняк Ж. А., Черняк А. А. Графовый алгоритм решения транспортных задач = Graph algorithm for solving transport problems // Доклады БГУИР. 2006. № 1 (13). С. 76–90. URL: <https://libeldoc.bsuir.by/handle/123456789/30986> (дата обращения: 09.04.2026).
7. Казьмина О. А., Пышкина Н. Ю. Особенности прогнозирования производительности труда на водном транспорте // Сборник научных статей национальной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова». СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2018. Т. 1. 308 с.
8. Ноубл Дж., Андерсон Т., Брэйтуэйт Г. [и др.]. Flex 4. Рецепты программирования. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 720 с.

ЦИФРОВОЕ ПРОИЗВОДСТВО И МАТЕРИАЛЫ БУДУЩЕГО

Е.В. Бурденко¹, доцент, канд. экон. наук

М.И. Раду¹, студент

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова», Москва
maxim13578@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается трансформация промышленного сектора в рамках Четвертой промышленной революции. В ней анализируется переход от линейных моделей производства к цифровым платформам, объединяющим искусственный интеллект и материалы будущего. Особое внимание уделяется синергии цифровых двойников и новых типов сырья, таких как графен и метаматериалы, а также экологическим аспектам и перспективам внедрения 4D-печати в медицине и аэрокосмической отрасли.

Введение

На протяжении веков производство оставалось линейным процессом: добыча сырья, механическая обработка и сборка. Однако сегодня разворачивается Четвертая промышленная революция [1], что заставляет пересмотреть сложившиеся подходы к организации строительства, использованию материалов.

Это не просто эволюция технических средств, а фундаментальная цифровая трансформация бизнеса. Алгоритмы, искусственный интеллект и аддитивные технологии объединяются в сквозные процессы, позволяя создавать объекты, которые ранее считались научной фантастикой. Данный синтез меняет облик мировой промышленности - от создания медицинских имплантатов до освоения глубокого космоса.

Основной текст

Остановимся на особенностях следующих элементов:

1. цифровое производство,
2. материалы будущего.

1. Цифровое производство – это подход, при котором производственные процессы, физическое оборудование и персонал объединяются в единую информационную экосистему с помощью современных технологий.

Главной целью цифрового производства является создание систем, который будут собирать данные, анализировать их и принимать решения с минимальным вмешательством человека [5].

Основу этого процесса составляют три столпа:

1) **3D-печать:** в отличие от традиционной фрезеровки, принтеры создают объекты слой за слоем. Это минимизирует отходы и позволяет производить детали сложнейшей формы [2].

2) **Генеративный дизайн:** инженер формулирует лишь вес, прочность, точки крепления, а ИИ генерирует тысячи оптимальных вариантов конструкции. Результатом часто становятся «бионические» структуры, которые невозможно изготовить ничем, кроме 3D-печати.

3) **Цифровые двойники:** виртуальные копии физических объектов или целых заводов. Они позволяют проводить виртуальные краш-тесты и оптимизировать процессы до того, как будет затрачен первый грамм реального сырья.

С помощью цифрового производства уменьшатся издержки производства, увеличится производительность и улучшится качество производимой продукции.

2. Материалы будущего. Возможности цифрового производства ограничены свойствами сырья. На смену традиционной стали и пластику приходят «умные» и программируемые структуры. Перечислим некоторые из них:

1) *Наноматериалы* (графен и углеродные нанотрубки): графен в сотни раз прочнее стали, невероятно легкий и обладает высочайшей электропроводностью.

2) *«Умные» материалы (Smart Materials)*: вещества, меняющие свойства под внешним воздействием. Пример – нитинол, он обладает способностью восстанавливать свою форму после многократной деформации.

3) *Метаматериалы*: искусственные структуры, чьи свойства зависят от их геометрии на микроуровне, а не от химического состава. Они способны уникальным образом преломлять свет или демонстрировать необычную упругость.

4) *Самовосстанавливающиеся материалы*: бетон и полимеры с микрокапсулами, которые при появлении трещин выпускают связующее вещество или активируют бактерий, восстанавливающих повреждения.

Настоящий прорыв происходит на стыке технологий и материалов - в 4D-печати [3]. Здесь четвертым измерением выступает время: объект, напечатанный на 3D-принтере из «умных» материалов, меняет свою форму или функции уже после создания в ответ на раздражитель. Инженеры используют материалы с эффектом памяти формы, гидрогели или сложные композиты. В саму геометрию объекта при печати закладывается математический «код». Трансформация запускается под воздействием триггера: влаги, тепла, света, магнитного поля или изменения уровня кислотности.

Программируемая материя – это материал, который по определенной команде или сигналу может менять свои физические свойства: плотность, форму, гибкость. В основе такой материи лежат сложные метаматериалы или абстрактная концепция будущего – клэйтроника. Клэйтроника предполагает объединение нанороботов, которые, взаимодействуя друг с другом, могут передавать энергию и информацию, образуя заданную форму в трехмерном пространстве.

Переход к Индустрии 4.0 несет в себе как экологические решения, так и новые вызовы.

1) Преимущества: сокращение отходов (до 90% по сравнению с фрезеровкой), снижение веса транспорта (на 20-40%, что уменьшает выбросы CO₂) и локализация производства (печать по требованию рядом с потребителем).

2) Вызовы: сложность переработки композитов. Разделение смол и волокон - энергозатратный процесс, требующий создания новых цепочек переработки в рамках экономики замкнутого цикла [4].

В таблице 1 представлен прогноз развития рынка новых материалов к 2030 году.

Таблица 1 – прогноз развития сегментов рынка новых материалов к 2030 г.

Тип материала	Среднегодовой рост (CAGR)	Ключевой экологический эффект	Сложность переработки
Биоразлагаемые полимеры	15-18%	Отказ от нефтепродуктов	Низкая
Металлические порошки	20-25%	Безотходное производство	Средняя
Самовосстанавливающийся бетон	25%	Долговечность инфраструктуры	Средняя
Углеродные композиты	10-12%	Снижение веса транспорта	Очень высокая

Тип материала	Среднегодовой рост (CAGR)	Ключевой экологический эффект	Сложность переработки
Графен и нанотрубки	35-40%	Эффективность аккумуляторов	Высокая

Практика Индустрии 4.0.

1) Аэрокосмическая отрасль (Relativity Space): стартап создал ракету Terran 1, которая на 85% напечатана на 3D-принтерах из запатентованных алюминиевых сплавов. Количество деталей сократилось в 100 раз, а цикл производства - до 60 дней.

2) Потребительские товары (Adidas): использование программируемой жидкой смолы и технологии Digital Light Synthesis (DLS) для создания кроссовок 4DFWD.

3) Медицина (Stryker): серийный выпуск позвоночных имплантатов из пористого титанового сплава. 3D-структура повторяет строение человеческой кости.

4) Строительство (ICON): 3D-печать зданий из высокопрочного цементного композит. Стены печатаются за пару дней, выдерживая ураганы лучше классических блоков.

Заключение

Цифровое производство и материалы будущего навсегда меняют правила игры. Бизнес переходит от эпохи, когда дизайн диктовался ограничениями станков, к эпохе, где цифровые платформы позволяют сначала придумать идеальные свойства продукта, а затем запрограммировать материал. Это путь к более эффективным бизнес-моделям и устойчивой экономике, где производится только то, что нужно, и ровно в необходимом количестве.

Литература

1. Шваб, К. Четвертая промышленная революция / К. Шваб. – М.: Издательство «Э», 2016. – 208 с.
2. Wohlers Associates. Wohlers Report 2023: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry [Электронный ресурс]. – Fort Collins: Wohlers Associates, 2023. – Режим доступа: <https:// Wohlers Associates. com/ Wohlers-report-2023> (дата обращения: 07.04.2026).
3. Tibbits, S. 4D Printing: Multi-Material Shape Change // Architectural Design. – 2014. – Vol. 84, № 1. – P. 116–121. – DOI: 10.1002/ad.1710.
4. McKinsey & Company. The circular economy: Moving from theory to practice [Электронный ресурс]. – 2022. – Режим доступа: <https:// www. mckinsey. com/ capabilities/ sustainability/ our- insights/ the- circular- economy- moving- from- theory- to- practice> (дата обращения: 07.04.2026).
5. Gibson, I. Additive Manufacturing Technologies / I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, M. Khorasani. – 3rd ed. – Cham: Springer, 2021. – 675 p. – DOI: 10.1007/978-3-030-56127-7.

РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ NURBS-КРИВЫХ НА ОСНОВЕ ВНЕШНИХ ДАННЫХ В СПЖЦ «САРУС»

В.В. Данилкин¹, студент

А.С. Зыкова¹, студент

О.Е. Стожаров¹, студент

С.А. Рыжов^{1,2}, аспирант

¹*Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров*

²*ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров*

seva.danilkin2244@gmail.com

Аннотация. В рамках работы разработан модуль RPLM.ShowCurves для отечественной системы управления жизненным циклом «Сарус», обеспечивающий визуализацию NURBS-кривых по данным из внешнего текстового файла. Модуль интегрируется в интерфейс CAD как отдельная команда, выполняет разбор описаний кривых (степень, периодичность, контрольные точки, веса, узловый вектор) и отображает результат на сцене. Архитектура построена на C++17, CMake и внутренних библиотеках платформы; модуль оформлен в виде динамической библиотеки. Приведены примеры тестирования на кривых различных типов и степеней, подтверждающие корректность работы. Разработка может использоваться для отладки импортируемой геометрии, анализа тестовых примеров и расширения средств геометрического моделирования в составе СПЖЦ.

Введение

Современные системы автоматизированного проектирования (САПР) и управления жизненным циклом продукции предъявляют высокие требования не только к математической точности алгоритмов, но и к удобству интерактивного анализа геометрии. При работе с параметрическими кривыми (NURBS, B-сплайны, кривые Безье) [0, 0] критически важным является наличие средств оперативной загрузки исходных данных, проверки их целостности и наглядного отображения в рабочем поле CAD-приложения. Особую значимость такие функции приобретают при отладке импортируемой геометрии, исследовании эталонных примеров и контроле корректности подготовки исходных данных.

В рамках данной работы разработан прикладной модуль для системы «Сарус» [0], обеспечивающий построение кривых на основе данных из внешнего текстового файла. Модуль встраивается в интерфейс платформы в виде отдельной команды, предоставляет диалог выбора файла, осуществляет синтаксический анализ описаний и формирует соответствующие геометрические объекты в сцене. Поддерживаются такие параметры, как степень кривой, признак периодичности, перечень контрольных точек, весовые коэффициенты и узловый вектор, что делает модуль применимым как для демонстрации кривых Безье, так и для более сложных NURBS-представлений [2].

С архитектурной точки зрения решение реализовано на языке C++17 и компилируется в динамическую библиотеку с использованием системы сборки CMake. В составе проекта выделены следующие компоненты: обработчик пользовательской команды, менеджер сессии модуля, средства локализации и анализатор входных данных. Такая организация облегчает сопровождение кода, отделяет логику обработки кривых от пользовательского интерфейса и создаёт основу для будущего расширения функциональности (например, поддержки новых форматов файлов, настройки режимов визуализации или добавления диагностических проверок геометрии).

Практическая значимость разработки состоит в том, что она предоставляет специализированный инструмент визуального контроля геометрических данных в составе

системы «Сарус». Модуль может применяться при отладке алгоритмов работы с кривыми, формировании демонстрационных материалов, а также для выявления ошибок в импортируемых моделях, когда требуется оперативно оценить форму кривой и правильность задания контрольных точек, весов и узлов.

Ключевая цель работы – знакомство с программной базой СПЖЦ «Сарус» и приобретение навыков интеграции нового функционала в данную систему.

Реализация модуля визуализации

Разработанный модуль, получивший идентификатор RPLM.ShowCurves, добавляет в интерфейс системы «Сарус» команду «Отображение кривых». При её активации пользователь выбирает текстовый файл, содержащий описание одной или нескольких кривых, после чего модуль производит разбор данных и отображает результат в графической сцене.

Основные функции модуля:

1. Визуализация наборов NURBS-кривых для тестовых и рабочих задач;
2. Построение кривых Безье как специализированного случая NURBS;
3. Контроль корректности формата входного файла;
4. Формирование диагностических сообщений при обнаружении ошибок;
5. Поддержка процессов отладки и геометрического анализа при разработке компонентов «Сарус».

В текущей версии реализованы следующие возможности:

- Загрузка одного или нескольких описаний кривых из файла с расширением .txt;
- Обработка параметров Degree, IsPeriodic, Control Points, Weights и Knots;
- Проверка согласованности количества контрольных точек, весов и узлов;
- Выявление типовых ошибок формата с указанием строки;
- Построение кривых на сцене с использованием геометрических и графических средств платформы [0];

В основе работы модуля лежат четыре ключевых элемента. Компонент пользовательского интерфейса инициирует процесс: открывает диалог выбора файла и обрабатывает возможные сбои на этапе взаимодействия с пользователем. Парсер кривых считывает данные из выбранного файла и преобразует их в объекты типа RGK::NURBSCurve. Сессия модуля отвечает за загрузку ресурсов и обеспечивает встраивание функциональности в существующую инфраструктуру приложения. Ресурсный компонент содержит локализованные наименования и графические элементы, необходимые для отображения интерфейса.

Пример структуры входного файла показан на рисунке 1.

```
Degree: 2
IsPeriodic: false
Control Points[3]:
0.0, 0.0, 0.0
0.1, 0.2, 0.0
0.0, 0.0, 0.0

Weights[3]:
1, 1, 1

Knots[6]:
0, 0, 0, 1, 1, 1
```

Рис. 1. Пример формата входного файла с кривой второй степени

Допускается размещение нескольких кривых в одном файле с разделением пустыми строками.

Интеграция в систему «Сарус»

Архитектура системы «Сарус» построена на принципе модульности: все функциональные компоненты оформляются в виде динамически подключаемых библиотек (DLL). Такой подход обеспечивает гибкость, упрощает обновление отдельных частей и снижает влияние изменений на систему в целом.

Для сборки библиотек используется инструмент CMake [0], который автоматизирует процесс компиляции и управления зависимостями. Применение CMake позволяет:

- Упростить настройку связей между модулями и внешними библиотеками;
- Обеспечить кроссплатформенную сборку;
- Использовать современные инструменты компиляции и отладки, повышая стабильность и производительность.

Благодаря такой организации достигается масштабируемость системы, позволяя разработчикам сосредоточиться на добавлении новых функций без модификации ядра приложения. Это особенно актуально для систем уровня СПЖЦ, охватывающих широкий спектр задач – от управления данными до сложных расчётов и визуализации.

Схема разработки и взаимодействия модуля с приложением «Сарус» представлена на рисунке 2.

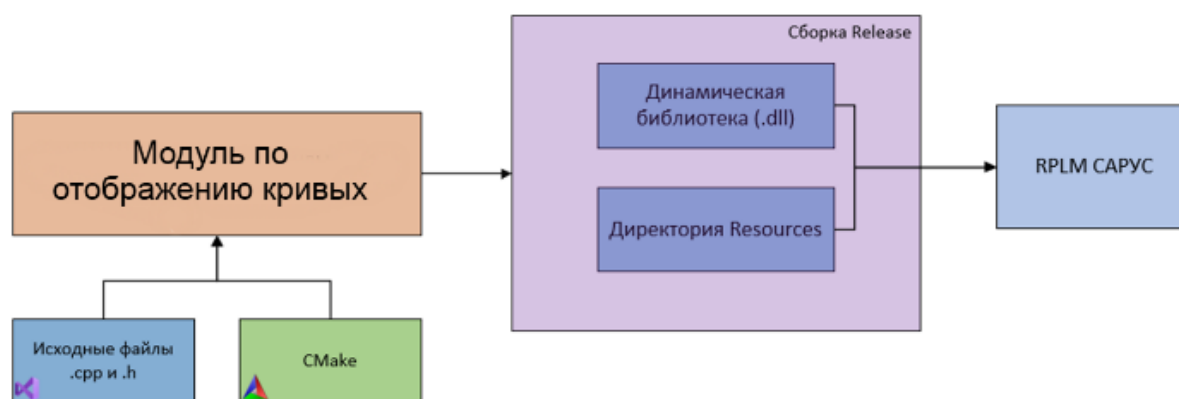


Рис. 2. Схема взаимодействия модуля с системой «Сарус»

Модуль с идентификатором RPLM.CAD.ShowCurves собирается из исходных файлов (.cpp, .h) с помощью CMake. Результатом сборки в конфигурации Release является динамическая библиотека (.dll) и директория с ресурсами. Готовая команда под названием «Отображение кривых» размещается на ленте интерфейса во вкладке «Модель». Внешний вид команды показан на рисунке 3.

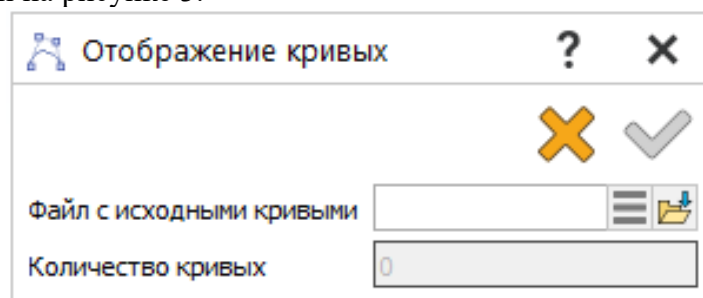


Рис. 3. Интерфейс окна команды «Отображение кривых»

Таким образом, разработан и интегрирован модуль визуализации кривых RPLM.CAD.ShowCurves в состав системы управления жизненным циклом «Сарус». Сборка модуля выполнена на основе исходных файлов на C++ с использованием CMake.

Тестирование разработанного модуля

Для проверки работоспособности модуля RPLM.CAD.ShowCurves проведены тесты

на различных типах кривых. Оценивались точность визуализации, корректность построения по заданным параметрам (степень, контрольные точки, узловой вектор) [0], а также устойчивость работы при обработке кривых разной степени сложности.

Тестировались следующие категории кривых:

- Кривые Безье 2-й степени;
- NURBS 5-й степени;
- NURBS 2, 3, 5 и 6-й степени;
- В-сплайны 2, 4, 6 и 12-й степени;
- Кривые Безье 1, 3, 7, 10 и 20-й степени.

Выбранный набор охватывает как простые кривые младших степеней, так и сложные объекты старших степеней, что позволяет комплексно оценить функциональность модуля в различных сценариях использования.

На рисунке 4 приведён пример отображения В-сплайнов 2, 4, 6 и 12-й степени.

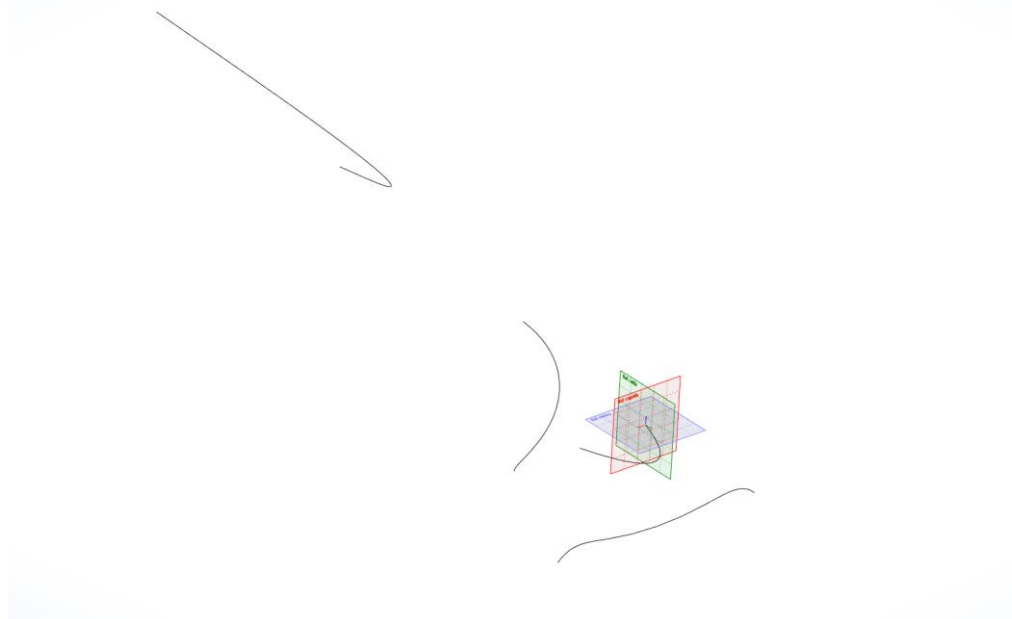


Рис. 4. Пример визуализации В-сплайнов 2, 4, 6 и 12-й степени

Заключение

В ходе выполнения работы создан модуль RPLM.ShowCurves, представляющий собой специализированное средство для визуализации кривых по внешним описаниям в среде СПЖЦ «Сарус». Разработанное решение сочетает практическую ценность для инженерной деятельности и гибкую архитектуру, удобную для последующего развития. Благодаря использованию C++17, CMake, Qt и внутренних библиотек платформы модуль успешно интегрируется в CAD-среду и может служить базой для дальнейшего расширения инструментов анализа и отображения геометрических объектов.

Литература

1. Piegl, L., Tiller, W. The NURBS Book. – 2nd ed. – Berlin: Springer, 1997.
2. Rogers, D. F. An Introduction to NURBS: With Historical Perspective. – San Francisco: Morgan Kaufmann, 2001.
3. Отечественная система полного жизненного цикла «Сарус» обеспечит импортонезависимость и безопасность. //САПР и графика, №12, 2023, с. 68-71
4. Farin, G. Curves and Surfaces for CAGD: A Practical Guide. – 5th ed. – San Francisco: Morgan Kaufmann, 2002.
5. Stroustrup, B. The C++ Programming Language. – 4th ed. – Boston: Addison-Wesley, 2013.
6. Foley, J. D., van Dam, A., Feiner, S. K., Hughes, J. F. Computer Graphics: Principles and Practice. – 3rd ed. – Boston: Addison-Wesley, 2013.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ СЕГМЕНТАЦИИ И МЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ОРГАНОВ РАСТЕНИЙ НА ОСНОВЕ АРХИТЕКТУРЫ U-NET

Е.И. Филосова, доцент, канд. техн. наук

Д.И. Салимов, студент

А.А. Донцов, студент

М.А. Мамылов, студент

Уфимский университет науки и технологий, Уфа
filosova@yandex.ru

Аннотация. В статье представлена разработка веб-системы для автоматизированной сегментации и метрического анализа органов растений на основе архитектуры U-Net. Система позволяет определять границы органов (листья, стебли, корни) культур рукколы и пшеницы с последующим расчётом площади и длины. Реализована калибровка масштаба с использованием шахматного паттерна, что обеспечивает точность измерений. Веб-интерфейс на базе FastAPI предоставляет возможность загрузки изображений, визуализации результатов и экспорта данных. Экспериментальные результаты демонстрируют эффективность предложенного подхода для агрономических исследований.

Введение

Современные задачи агрономии требуют точных и воспроизводимых методов измерения морфологических параметров растений. Традиционные ручные измерения площади листьев, длины стеблей и других органов являются трудоёмкими, субъективными и трудно масштабируемыми для больших выборок.

Развитие технологий компьютерного зрения и глубокого обучения [1] открыло новые возможности для автоматизации анализа растительных объектов. Анализ российских и зарубежных источников показал, что исследования в агропромышленном секторе с применением компьютерного зрения на сегодняшний день являются очень актуальными [2]. Для задач компьютерного зрения широко применяются сверточные нейронные сети.

Архитектура U-Net, изначально разработанная для биомедицинской сегментации, показала высокую эффективность в задачах выделения границ объектов на изображениях. Целью данного исследования является создание системы сегментации и метрического анализа органов растений на основе U-Net с возможностью перевода пиксельных величин в физические единицы измерения.

Задачи исследования:

- 1) Реализация модели семантической сегментации на основе U-Net для культур рукколы и пшеницы.
- 2) Разработка модуля калибровки масштаба для перевода пикселей в миллиметры.
- 3) Создание веб-интерфейса для загрузки изображений и визуализации результатов.
- 4) Обеспечение хранения и экспорта данных анализа.

Решение перечисленных задач позволит разделять виды растений и выделять отдельные органы у каждого растения. На основе разработанной системы можно будет создавать универсальные системы контроля, которые смогут работать с разными посевами и автоматически распознавать как культурные растения, так и сорняки.

Использование модели U-Net

В работе [3] сверточные сети с моделью U-Net применялись для сегментации биомедицинских изображений. Сеть с архитектурой U-Net получила своё название из-за

симметричной U-образной формы, которая состоит из классической свёрточной сети, извлекающей контекст изображения (энкодер) и симметричного расширяющегося пути, который позволяет точно локализовать границы объектов(декодер). Авторы предложили стратегию обучения, основанную на интенсивной аугментации данных и это позволило нейросети показать хорошие результаты даже при наличии всего нескольких десятков аннотированных изображений что актуально и в данном исследовании.

Для обучения и тестирования модели были использованы изображения двух культур: 34 изображения рукколы и 256 изображения пшеницы с размеченными органами растений. Разметка выполнена в формате полигонов с выделением классов: фон, корень, стебель, листок [4]. На начальном этапе была выполнена предобработка изображений, которая включает в себя нормализацию яркости, приведение к размеру 512×512 пикселей и аугментацию (повороты, отражения, изменение контраста) для увеличения объёма выборки.

Модель U-Net состоит из кодирующей и декодирующей частей с пропускающими соединениями. Кодирующий путь извлекает признаки изображения, декодирующий – восстанавливает пространственную структуру для пиксельной классификации.

Функция потерь рассчитывается как комбинация кросс-энтропии и коэффициента Dice:

$$L = \alpha * CE + \beta * (1 - Dice) \quad (1)$$

где CE – кросс-энтропия,
Dice – коэффициент схожести масок,
 α и β – весовые коэффициенты.

Для перевода пиксельных величин в физические единицы реализован модуль калибровки. Используется шахматный паттерн с известным размером клетки CHECKER_SIZE_MM, равным 10 мм и размером сетки 7×4 внутренних угла. Коэффициент масштаба рассчитывается по формуле:

$$K = S_{real} / S_{px} \quad (2)$$

где S_{real} – реальный размер клетки в мм,
 S_{px} – размер в пикселях на изображении.

Базовый коэффициент BASE_SCALE_FACTOR = 0.10556744 мм/пиксель был определён экспериментально на калибровочной выборке.

Площадь органа растения вычисляется как количество пикселей маски, умноженное на квадрат коэффициента масштаба:

$$Area_{mm2} = N_{pixels} \cdot K^2 \quad (3)$$

где N_{pixels} – количество пикселей класса,
K – коэффициент масштаба.

Периметр рассчитывается через длину контура маски. Дополнительно вычисляется фактор компактности формы.

Система была реализована на языке Python с использованием фреймворка FastAPI для бэкенда. Для хранения результатов анализа, включая исходные и сегментированные изображения использовалась база данных SQLite. Веб-интерфейс обеспечивает загрузку файлов, отображение масок и экспорт данных в формате CSV.

При подготовке рукописи использовались инструменты искусственного интеллекта для редактирования текста и структурирования материала. Все научные результаты, код системы и экспериментальные данные получены авторами самостоятельно.

Результаты исследования

Метрики качества модели U-Net на тестовой выборке представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Метрики качества сегментации

Культура	IoU	Precision	Recall	F1-Score
Руколла	0.89	0.92	0.87	0.89
Пшеница	0.85	0.88	0.83	0.85

Для оценки точности измерений было проведено сравнение автоматических расчётов с ручными измерениями. Средняя погрешность площади составила 4.2%, периметра – 6.1%.

На рисунке 1 представлен пример сегментации органов рукколы с наложением масок.

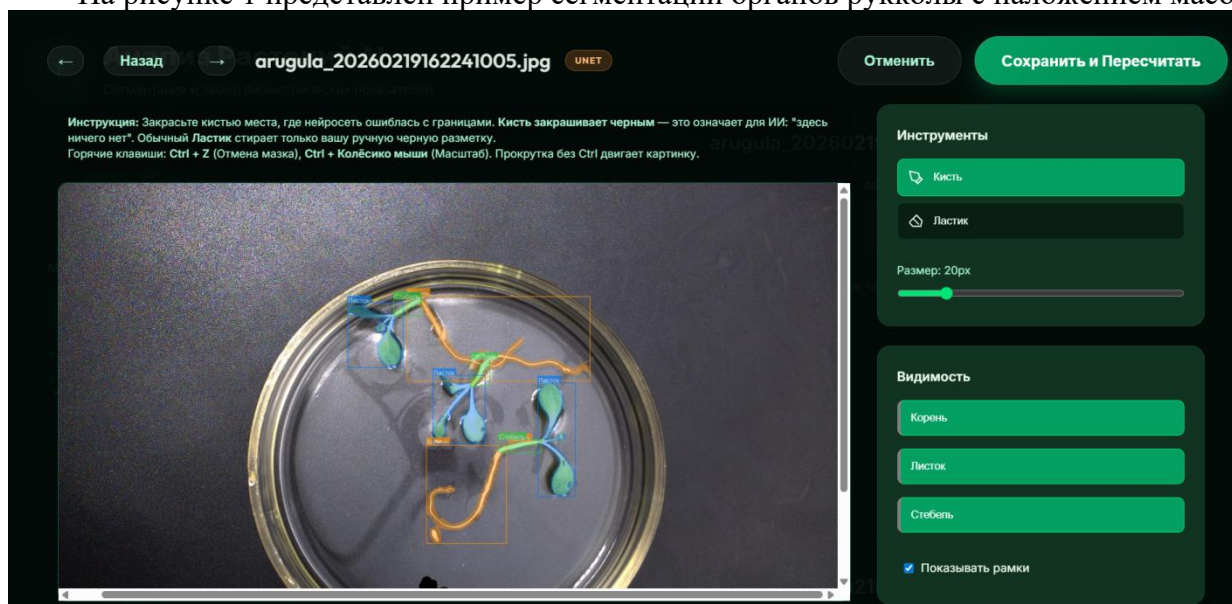


Рис. 1. Пример сегментации рукколы

На рисунке 2 показан интерфейс веб-системы с визуализацией результатов анализа.

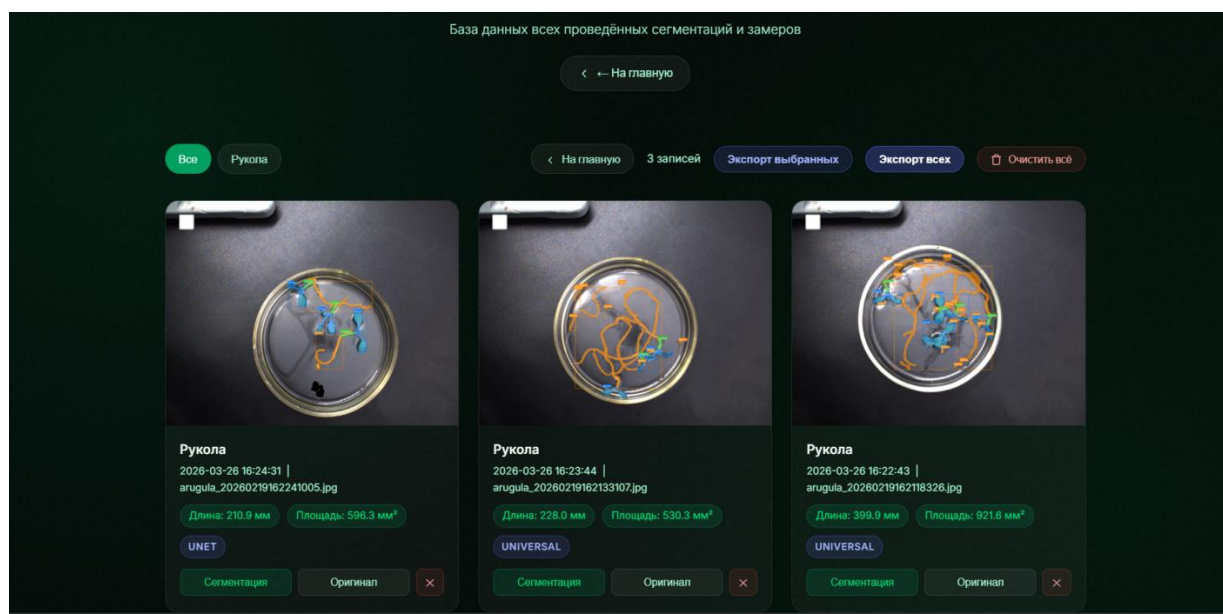


Рис. 2. Визуализация результатов анализа в веб-системе

Среднее время обработки одного изображения составило 1.5 секунды на GPU NVIDIA GeForce RTX 3060. При использовании CPU время увеличивается до 4.2 секунды.

Заключение

В ходе работы разработана система сегментации и метрического анализа органов растений на основе архитектуры U-Net. Система обеспечивает точную пиксельную сегментацию органов рукколы и пшеницы с IoU до 0.89. Реализован перевод пиксельных величин в физические единицы (мм, мм²) с погрешностью менее 6%. Веб-интерфейс

позволяет загружать изображения и визуализировать результаты. Предусмотрено хранение и экспорт данных в форматах CSV и ZIP.

Разработанная модель обеспечивает количественную оценку развития корневой системы и надземной части, что может помочь работникам аграрной сферы отслеживать динамику роста и здоровье посевов, вовремя выявлять отклонения. Применение алгоритмов машинного обучения для обработки изображений растений позволяет автоматизировать селекцию (например, быстрее отбирать наиболее перспективные образцы), измерять различные морфологические параметры растений (например, вычислять площадь листьев, высоту и объем биомассы по фотографиям), определять аномалии (например, выявлять признаки болезней или нехватки питательных веществ [5]). Поэтому перспективами развития системы являются расширение датасета дополнительными видами культур, интеграцию с мультиспектральными камерами и развёртывание системы на беспилотных платформах для полевого мониторинга.

Литература

1. Luo, Z. Semantic segmentation of agricultural images: A survey / Z. Luo, J. Wang, W. Li // *Information Processing in Agriculture*. – 2024. – Vol. 11, № 2. – P. 172–189.
2. Янишевская Наталья Александровна, Болодурина Ирина Павловна ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МОДЕЛИ РАСПОЗНАВАНИЯ ПОРАЖЕНИЙ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ // *Вестник ЮУрГУ. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника*. 2021. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-tehnologiy-kompyuternogo-zreniya-dlya-razrabotki-modeli-raspoznavaniya-porazheniy-kulturnyh-rasteniy> (дата обращения: 29.03.2026).
3. Ronneberger, O. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation / O. Ronneberger, P. Fischer, T. Brox // *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015: 18th International Conference, Munich, Germany, October 5–9, 2015, Proceedings, Part III*. – Cham: Springer, 2015. – P. 234–241.
4. Goodfellow, I. Deep Learning / I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville. – Cambridge: MIT Press, 2016.
5. Матохина, А. В. Анализ развития растений с помощью методов компьютерного зрения / А. В. Матохина, И. С. Прохорова // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. – 2023. – Т. 23, № 1. – С. 128–135.

МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ТЕПЛОВОГО ПОТОКА ОТ ЗАГЛУБЛЕННОЙ ТРУБЫ В ГРУНТЕ

М.О. Уткин ¹, аспирант

Е.В. Федорова ¹, студент

А.В. Дмитриев ¹, профессор, д-р техн. наук

¹ ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»
209maks@mail.ru

Аннотация. Исследование посвящено решению задачи организации отопления аграрных и промышленных объектов с использованием подземных теплопроводов (трубопроводов с жидким теплоносителем либо паропроводов). Приводится аргументация почему существующие методы численного моделирования теплораспределения в грунте не дают ответа на фундаментальный вопрос: «какой размер расчётной области следует принять?». Аргументируется, почему при моделировании в Ansys Fluent для обеспечения сеточной независимости область стремится к бесконечности, и что данное программное обеспечение неприемлемо для расчётов данного типа.

Введение

Решением задачи стационарных тепловых процессов для систем теплоотвода от одиночных и групповых источников в разные годы занимались Г. Карслоу, Д. Егер А.Ю. Крайнов, П.Я. Полубаринова-Кочина, В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел, Н.Д. Якимов и другие отечественные и зарубежные ученые. Подобные задачи решались ранее коллективами авторов в ТК 465 «Строительство», некоммерческом партнерстве «Производители современной минеральной изоляции «Росизол», главтехнормированием Госстроя СССР (Минстроя России), Московским государственным строительным университетом, ОАО «ВНИПИэнергопром», АО «Инжпроектсервис» и были отражены в дальнейшем в ГОСТ и СНиП, действующих на территории Российской Федерации.

Большое количество работ посвящено изучению теплообмена при передаче тепла от тела к окружающей среде. Однако, имеется недостаток научно обоснованных рекомендаций по выбору геометрических параметров расчетной области, оценке погрешности вычислений математического моделирования при расчете теплораспределения в грунте. Обозначенные выше практические и теоретические проблемы позволили сформулировать цель и задачи настоящего исследования.

Объектом исследования являются тепловые процессы в грунте, возникающие при отводе теплоты от искусственных источников (в частности – от сферических тел и цилиндрических труб, расположенных под поверхностью земли).

Предметом исследования являются приближённо-аналитические методы моделирования стационарного теплоотвода от одиночных и групповых источников тепла (сфер и горизонтальных труб), с учётом граничных условий на поверхности грунта.

Цель работы: разработка и обоснование приближённо-аналитических методов моделирования стационарных тепловых процессов в грунте для систем теплоотвода от одиночных и групповых источников (сферического тела и цилиндрических труб).

Задачи исследования:

1. построить приближённо-аналитическое решение задачи стационарного теплоотвода от сферического тела, расположенного в полупространстве грунта, с учётом конвективного теплообмена на поверхности грунта.

2. разработать приближённо-аналитическую модель теплоотвода от одиночной горизонтальной цилиндрической трубы, заложённой в грунт. Обобщить подход на случай периодически расположенного ряда параллельных труб;

3. оценить погрешность предложенных приближённых методов решения задачи стационарного теплоотвода от сферического тела, одиночной трубы, ряда труб, проложенных в грунте;

4. выполнить численное моделирование тепловых полей в грунте с использованием программного комплекса ANSYS Fluent для одиночной трубы, проложенной в грунте;

Методы расчета теплового потока от заглубленной трубы в грунте

Так как одним из основных источников теплопотерь в технологии теплоснабжения объектов являются магистральные трубопроводы, рассмотрим методы расчета теплового потока от заглубленной трубы в грунте. При проектировании тепловых трасс необходимо руководствоваться СП 315.1325800.2017 «Тепловые сети бесканальной прокладки. Правила проектирования» [1]. Данное СП содержит следующие методики:

- Методика проверки теплопровода на устойчивость;
- Методика расчета компенсации температурных деформаций;
- Методика испытаний стыков теплопроводов с изоляцией из пенополиуретана в полиэтиленовой оболочке;
- Методика проведения работ по теплогидроизоляции стыков труб в ППУ изоляции.

Однако, данное СП хот и дает частичное представление о тепловых процессах, происходящих в грунте, но не содержит в себе информации по оценке теплопотерь в грунте.

В то же время, в СП 61.13330.2012 «Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. Актуализированная редакция СНиП 41-03-2003» приводятся методы расчёта толщины тепловой изоляции оборудования и трубопроводов, расчётные характеристики теплоизоляционных материалов [2]. В приложении В «Методы расчета тепловой изоляции оборудования и трубопроводов» данного СП приводятся расчетные формулы стационарной теплопередачи в теплоизоляционных конструкциях. Поверхностная плотность теплового потока через плоские поверхности рассчитывается по формулам (в качестве примера здесь и далее приведем формулы для однослойной плоской стенки. Формулы и обозначения приведены из СП):

$$q_F = \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{R_{\text{вн}} + R_{\text{ст}} + R_{\text{уз}} + R_{\text{н}}} \quad (1)$$

Линейная плотность теплового потока через цилиндрические поверхности рассчитывается по формуле (однослойная цилиндрическая стенка):

$$q_L = \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{R_{\text{вн}}^L + R_{\text{ст}}^L + R_{\text{уз}}^L + R_{\text{н}}^L} \quad (2)$$

где q_F – поверхностная плотность теплового потока через плоскую теплоизоляционную конструкцию, Вт/м;

$t_{\text{в}}$ – температура среды внутри изолируемого объекта, °С;

$t_{\text{н}}$ – температура окружающей среды, °С;

$R_{\text{вн}}$ – сопротивление теплоотдаче на внутренней поверхности стенки изолируемого объекта, м²·°С/Вт;

$R_{\text{н}}$ – то же, на наружной поверхности теплоизоляции, м²·°С/Вт;

$R_{\text{ст}}$ – термическое сопротивление стенки изолируемого объекта, м²·°С/Вт;

$R_{\text{уз}}$ – то же, плоского слоя изоляции, м²·°С/Вт;

q_L – линейная плотность теплового потока через цилиндрическую теплоизоляционную конструкцию, Вт/м;

$R_{вн}^L$ – линейное термическое сопротивление теплоотдаче внутренней стенки изолируемого объекта, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$;

R_n^L – то же, наружной изоляции, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$;

$R_{см}^L$ – линейное термическое сопротивление цилиндрической стенки изолируемого объекта, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$;

$R_{из}^L$ – то же, цилиндрического слоя изоляции, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$;

Сопротивления теплоотдаче и термические сопротивления стенок определяются по формулам:

$$R_{вн} = \frac{1}{\alpha_{вн}}; R_n = \frac{1}{\alpha_n}; R_{из} = \frac{\delta_{из}}{\alpha_{из}}; R_{см} = \frac{\delta_{см}}{\alpha_{см}}; \quad (2)$$

$$R_{вн}^L = \frac{1}{\pi d_{вн}^{см} \cdot \alpha_{вн}}; R_n^L = \frac{1}{\pi d_n^{из} \cdot \alpha_n}; R_{из}^L = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_{из}} \cdot \ln \frac{d_n^{из}}{d_n^{см}}; \quad (3)$$

$$R_{см}^L = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_{см}} \cdot \ln \frac{d_n^{см}}{d_{вн}^{см}} \quad (4)$$

где $\alpha_{вн}$, α_n – коэффициенты теплоотдачи внутренней поверхности стенки изолируемого объекта и наружной поверхности изоляции, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$;

$\lambda_{см}$, $\lambda_{из}$ – коэффициенты теплопроводности соответственно материала стенки изолируемого объекта однослойной изоляции, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$;

$\delta_{см}$, $\delta_{из}$, – толщина соответственно стенки изолируемого объекта, однослойной изоляции, м;

$d_{вн}^{см}$, $d_n^{см}$ – внутренний и наружный диаметры стенки изолируемого объекта, м;

$d_n^{из}$ – наружный диаметр изоляции, м.

Температуры на внутренней и наружной поверхностях стенки изолируемого объекта плоской формы:

$$t_{вн}^{см} = t_{г} - q_F \cdot R_{вн}; t_n^{см} = t_{вн}^{см} - q_F \cdot R_{см}; \quad (5)$$

Распределение температур в данной методике рассчитывается только на границах слоев, не определяя температуру грунта в отдалении от трубы, а также температуру на поверхности грунта. В практических расчетах тепловой изоляции принимается ряд допущений, позволяющих использовать упрощенные расчетные формулы. Сопротивление теплоотдаче от внутренней среды к внутренней поверхности стенки изолируемого объекта для жидких и газообразных сред является пренебрежимо малым в сравнении с термическим сопротивлением теплоизоляционного слоя и в практических расчетах может не учитываться.

Теплопроводность стенок изолируемого оборудования и трубопроводов, изготовленных из металла, в десятки раз превышает теплопроводность изоляции, поэтому термическим сопротивлением стенки также можно пренебречь без заметного снижения точности расчета.

При расчете тепловой изоляции объектов, расположенных под землей, учитывается их тепловое взаимодействие с массивом окружающего грунта. Плотность теплового потока через теплоизоляционные конструкции, граничащие с грунтом, определяется по формулам (1 и 2), в которых термические сопротивления внешней теплоотдаче и заменяются термическим сопротивлением грунта.

В общем случае термическое сопротивление грунта зависит от конфигурации и расположения изолируемого объекта в массиве грунта, его температуры и теплопроводности, что влияет на распределение температур и тепловых потоков в теплоизоляционном слое.

В инженерных расчетах принимается допущение об одномерности температурного поля в теплоизоляционном слое, что позволяет с достаточной для практики точностью использовать формулы (3, 4 и 5) для расчета термического сопротивления плоских и цилиндрических теплоизоляционных конструкций подземных объектов.

В части В.3.3 «Подземная бесканальная прокладка» СП 61.13330.2012 рассматривается аналогичная нашей проблема. Согласно СП, тепловые потери трубопроводов двухтрубных тепловых сетей бесканальной прокладки, расположенных в грунте на одинаковом расстоянии от поверхности до оси труб H , м, определяются по формулам:

$$q_1^L = \frac{(t_{\theta 1} - t_n)(R_{uz2}^L + R_{zp2}^K) - (t_{\theta 2} - t_n)R_0}{(R_{uz1}^L + R_{zp1}^K)(R_{uz2}^L + R_{zp2}^K) - R_0^2} K; \quad (7)$$

$$q_2^L = \frac{(t_{\theta 2} - t_n)(R_{uz1}^L + R_{zp1}^K) - (t_{\theta 1} - t_n)R_0}{(R_{uz2}^L + R_{zp2}^K)(R_{uz1}^L + R_{zp1}^K) - R_0^2} K; \quad (8)$$

$$q_{1,2}^L = q_1^L + q_2^L; \quad (9)$$

q_1^L, q_2^L – линейные плотности теплового потока от подающего и обратного трубопроводов, Вт/м;

$t_{\theta 1}, t_{\theta 2}$ – температуры подающего и обратного трубопроводов, °С;

K – коэффициент дополнительных потерь;

R_{uz1}^L, R_{uz2}^L – термические сопротивления изоляции подающего и обратного трубопроводов, м·°С/Вт;

R_{zp}^K – термическое сопротивление грунта при бесканальной прокладке, м·°С/Вт, определяется по формуле

$$R_{zp}^K = \frac{1}{2\pi\lambda_{zp}} \ln \left[\frac{2H}{d} + \sqrt{\left(\frac{2H}{d} \right)^2 - 1} \right]; \quad (10)$$

где d – наружный диаметр изолированного трубопровода, м;

подающего – d_1 , обратного – d_2 ;

λ_{zp} – теплопроводность грунта, Вт/(м·°С);

H – глубина заложения (расстояние от оси труб до поверхности земли), м;

R_0 – термическое сопротивление, обусловленное тепловым взаимодействием двух труб, м·°С/Вт, определяется из выражения:

$$R_0 = \frac{\ln \sqrt{1 + \left(\frac{2H}{K_{1,2}} \right)^2}}{2\pi\lambda_{zp}}; \quad (11)$$

где $K_{1,2}$ – расстояния между осями труб по горизонтали, м.

По методикам СП 61.13330.2012 имеются онлайн калькуляторы, находящиеся в открытом доступе [3 и 4], однако, данные калькуляторы служат для подбора изоляции и не позволяют оценить теплораспределение в грунте. Математика СП 61.13330.2012 схожа с

разработанной нами математикой приведенной, однако, она рассчитана только для упрощенных расчетов и не имеет возможности оценки погрешности вычислений.

Требования к прокладке трубопроводов в грунте для зданий, также отражены в СНиП 2.04.01-85 [5]. В нем приведены указания по способу прокладки трубопроводов при вводе в здание, глубина залегания трубопроводов, однако не приведены способы подсчета теплопотерь.

В ГОСТ 32025-2012 [6] приводится методика определения характеристик теплопереноса в цилиндрах заводского изготовления при стационарном тепловом режиме, где представленный математический аппарат описывает теплоперенос через стенку (изоляция), однако, далее не рассматривается теплоперенос в иных средах кроме воздушной.

В тоже время математический аппарат, описывающий тепловой поток в шаре и конусе приводится в работе Карслоу Г. и Егер Д. [7]. В главе 9 работы [7] при помощи классического метода разделения переменных решен ряд важных задач для шара, полого шара и области, ограниченной изнутри сферической поверхностью. Также в части § 9 гл. XIII приводятся решения задач о составных шарах, сферических или неограниченных областях со сферическим сердечником из идеального проводника, о выделении тепла в неограниченной среде.

Решение схожей с нашей задачей был приведен в работе А.Ю. Крайнова [8]. Так, в главе 3.6 «Теплопередача через сферические и цилиндрические слои» приводится математический уравнение стационарной теплопроводности для цилиндрического и сферического слоев, а также определение теплового потока через шаровой слой из закона Фурье. В главе 3.7. «Теплообмен шара с окружающей средой» приводится математический аппарат по теплообмену шара с окружающей средой, однако, здесь не определяется погрешность вычислений, и окружающая среда считается бесконечной, поэтому данный математический аппарат в нашем случае не подходит для определения теплораспределения в грунте.

Фундаментальной работой по определению теплораспределения в грунте является работа Полубаринова-Кочиной П.Я. [9], гл. IX, §6. В данной монографии сформулирован и рассмотрен комплекс фундаментальных проблем теории фильтрации, объединяющий математические, физические и прикладные аспекты. Ряд математических постановок, выдвинутых Полубариновой-Кочиной П.Я. был доработан и использован в нашей работе в части 2.2.

Задачи по теплопередаче теплоты через цилиндрическую и шаровую стенку также рассматривались коллективом авторов Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. в работе [10]. Помимо этого, в работе приводится обобщенное решение задач теплопроводности в плоской, цилиндрической и шаровой стенках.

Математическое моделирование тепловых процессов в грунте для одиночной трубы в программном комплексе ANSYS

Для определения геометрических параметров системы утилизации тепловой энергии от низкопотенциального источника тепла рассмотрим распределение тепловых потоков от трубы, проложенной в грунте. Моделирование рассеивания тепла в земле было проведено с помощью универсальной программной системы анализа методом конечных элементов Ansys. Версия ПО Ansys 2023 R1. Задействованный блок – Ansys Fluent. Расчетная сетка представлена на рисунке 1. Результаты математического моделирования приведены на рисунке 2.

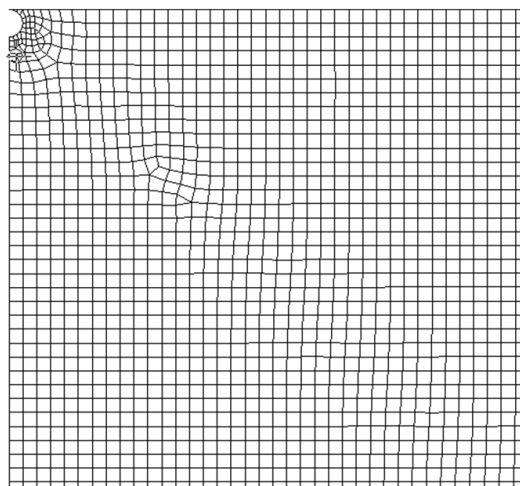


Рис. 1. Расчетная сетка для выполнения моделирования

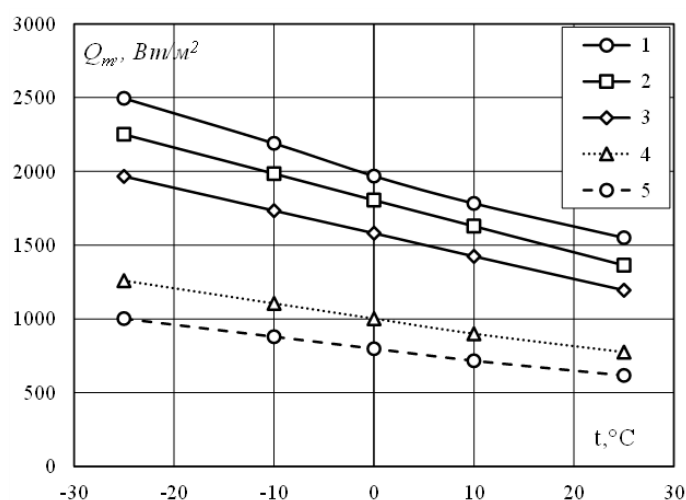


Рис. 2. График зависимости теплового потока трубы от температуры наружного воздуха при различных диаметрах трубы: 1 – 32 мм; 2 – 40; 3 – 50; 4 – 100; 5 – 150

Заключение

На основе приведенных методов расчета можно сделать вывод о том, что данные источники не могут быть полностью применены для решения задачи по теплоотводу от сферического (цилиндрического) тела в грунте и определению температуры на поверхности грунта.

Исходя из полученных данных математического моделирования в Ansys, можно указать, что полученные расчетные данные не выходят на асимптоту. Последующее увеличение расчетной области грунта для заглубленной трубы не приведет нас к сеточной независимости, исходя из чего можно утверждать, что математический аппарат, заложенный в Ansys, не позволяет полностью рассчитать теплосъем от одиночно проложенной трубы.

Литература

1. СП 315.1325800.2017. Тепловые сети бесканальной прокладки. Правила проектирования / Минстрой России. – М.: Стандартинформ, 2018. – 91 с.
2. СП 61.13330.2012. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов / Минрегион России. – М.: Минрегион России, 2012. – 98 с.
3. Калькулятор расчёта теплотерь трубопровода. Техстандарт. URL: <https://tech-stc.ru/system-calculators/heating-calculations-pipeline-heat-loss.php> (дата обращения: 19.01.2026).
4. Онлайн-калькулятор теплотерь трубопровода. МосОбогрев. URL: <https://mosobogrev.ru/calculator/> (дата обращения: 19.01.2026).

5. Строительные нормы и правила. Внутренний водопровод и канализация зданий. СНиП 2.04.01-85. МОСКВА 1997.
6. ГОСТ 32025-2012. Тепловая изоляция. Метод определения характеристик теплопереноса в цилиндрах заводского изготовления при стационарном тепловом режиме. – М.: Стандартинформ, 2014. – 24 с.
7. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. Перевод со второго английского издания под редакцией профессора Померанцева А.А. – М.: Наука, 1964г. – 488с.
8. Полубаринова-Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод. Изд с 2-е. ГР Ф-МЛ «Наука», М. 1977. 664 с.
9. Крайнов А.Ю. Основы теплопередачи. Теплопередача через слой вещества: учеб. пособие. – Томск: STT, 2016. – 48 с.
10. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергия, 1975. – 488с.

ОТ КОГНИТИВНОЙ КАРТЫ К JSON-ФАЙЛУ: РЕАЛИЗАЦИЯ СРЕДСТВА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СТИЛИЗАЦИИ ДАШБОРДОВ

Е.В. Ляпунцова ¹, профессор, д-р техн. наук

А.О. Чжен ¹, аспирант

А.С. Курская ¹, студент

¹ *Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва*
mail@fatdata.ru

Аннотация. В статье рассматривается подход к автоматической генерации тем оформления дашбордов для BI-системы Visiology. Когнитивная карта структурирует входные характеристики темы и связи между параметрами визуального оформления. На основе текстового описания, задаваемого пользователем, ИИ формирует JSON-файл темы. Практическая реализация подхода выполнена в виде бота в мессенджере.

Введение

В настоящее время дашборды широко применяются в системах аналитики и поддержки принятия решений как средство представления данных. Наряду с информативностью и корректностью отображения показателей, существенную роль играет визуализация, которая создаёт удобство восприятия, согласованность интерфейса и соответствие требованиям предметной области. В BI-системе Visiology для решения этой задачи используется тема оформления – преднастроенный набор параметров, задающих внешний вид виджетов и фона дашборда. Применение темы позволяет переносить настройки оформления между различными дашбордами, обеспечивать единообразие визуального представления и сохранение корпоративного стиля. Однако формирование темы нередко осуществляется вручную, что затрудняет унификацию стилевых решений и снижает уровень формализации данного процесса.

Перспективным подходом к решению указанной проблемы является использование когнитивной карты как промежуточной модели, отражающей связи между характеристиками темы и параметрами её визуального оформления. Такой подход может использоваться для структурирования входного описания и последующей ИИ-генерации JSON-представления темы, согласно внутренней структуре BI-системы, что позволяет автоматизировать процесс стилизации и повысить согласованность визуальных настроек.

Основной текст

Для автоматизации необходимо формализовать те характеристики, которые обычно задаются на уровне общего представления. К ним относятся: визуальный тон, уровень контрастности, особенности цветовой палитры, характер акцентов, степень формальности оформления и другие параметры, определяющие восприятие дашборда пользователем. Если на практике подобные свойства часто описываются неформально, то для автоматической генерации они должны быть представлены в виде структуры, допускающей однозначную интерпретацию. В качестве такой структуры в работе используется когнитивная карта.

В отличие от неструктурированного текстового описания, когнитивная карта позволяет выделить ключевые концепты, влияющие на визуальное оформление и зафиксировать связи между ними. За счёт этого тема дашборда представляется не как набор отдельных параметров, а как целостная модель, отражающая зависимость визуальных характеристик от контекста использования интерфейса.

В рамках работы когнитивная карта выступает как промежуточный компонент между пользовательским запросом и JSON-файлом темы оформления. Она позволяет интерпретировать словесное описание желаемого стиля, выделить его основные признаки и использовать их как основу для ИИ-генерации конфигурации темы.

Разработанная карта включает несколько групп взаимосвязанных узлов. Первая группа отражает входные характеристики темы, задаваемые пользователем: отрасль или контекст, режим оформления, стиль, акцент, уровень контраста, а также параметры теней и скруглений. Эти характеристики используются как исходные данные для формирования темы.

Вторая группа узлов описывает производные свойства визуального оформления, включая фон, основную палитру цветов, акцентную палитру, строгость интерфейса, глубину визуального оформления, мягкость формы и выделение ключевых элементов.

Третья группа связана с результирующим представлением темы, на основе которого формируется JSON-файл, пригодный для применения в BI-системе Visiology.

На рисунке 1 представлена когнитивная карта автоматической стилизации дашбордов, отражающая взаимосвязи между смысловыми характеристиками интерфейса, стилевыми параметрами темы и результирующим JSON-представлением.

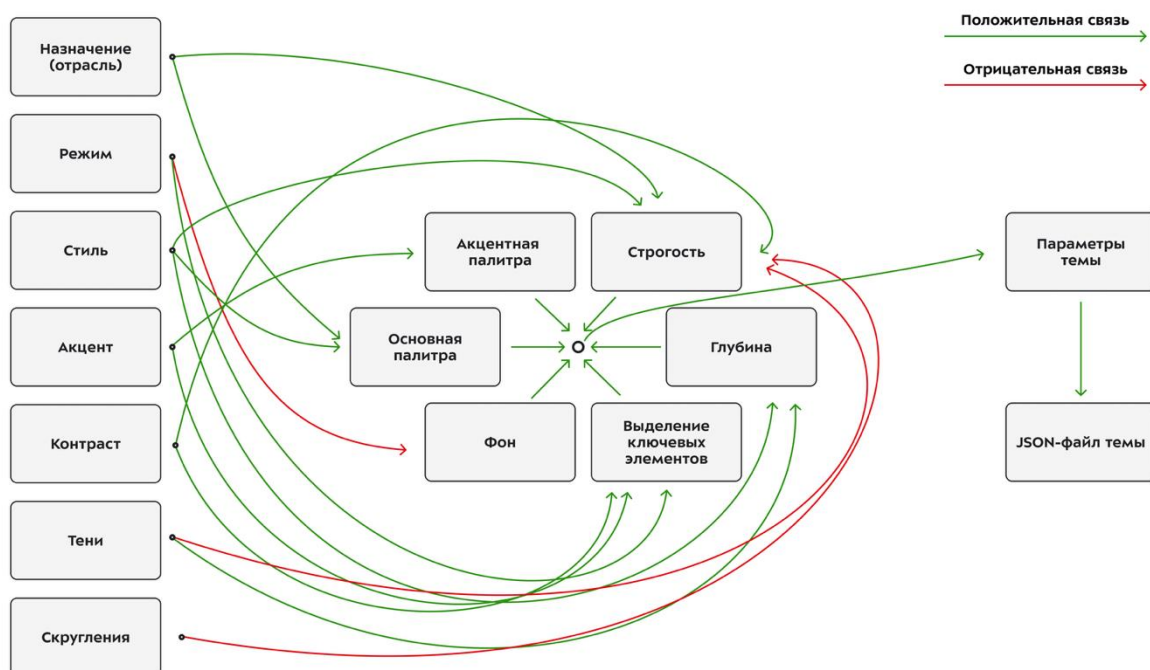


Рис. 1. Когнитивная карта автоматической стилизации дашбордов

Как следует из представленной карты, входные характеристики темы не определяют итоговую конфигурацию изолированно друг от друга. Так, режим влияет на параметры фона, стиль – на строгость и общую палитру, акцентные цвета – на акцентную палитру и выделение ключевых элементов, а тени и скругления – на глубину интерфейса и мягкость формы. Когнитивная карта отражает не отдельные параметры темы, а систему их взаимосвязей.

Практическая значимость такой модели заключается в снижении неоднозначности при описании темы оформления. В условиях ручной настройки разработчики могут по-разному интерпретировать одно и то же словесное описание стиля. Использование когнитивной карты позволяет сделать этот процесс более формализованным, так как переход от содержательных характеристик к визуальным параметрам осуществляется через систему концептов и связей.

Кроме того, когнитивная карта обеспечивает основу для последующего преобразования в JSON-файл. Поскольку стилевые характеристики уже представлены в виде

структурированной модели, их можно интерпретировать как входные данные для генерации конфигурации. Тем самым карта становится связующим звеном между концептуальным описанием желаемого интерфейса и его технической реализацией в виде темы оформления для BI-системы Visiology.

Использование может быть представлено как последовательность нескольких этапов. На первом этапе интерпретируются входные характеристики, задаваемые пользователем в текстовом запросе. На втором этапе на основе когнитивной модели формируется структурированное представление свойств будущей темы. На третьем этапе ИИ генерирует JSON-файл конфигурации, пригодный для применения в системе Visiology.

Особенность данного подхода состоит в том, что итоговые параметры темы определяются не одним входным признаком, а совокупностью взаимосвязанных характеристик. Поэтому генерация JSON-файла не сводится к простому однозначному отображению “один параметр запроса – одно поле конфигурации”, а представляет собой результат ИИ-интерпретации набора входных данных с учётом когнитивной модели темы.

JSON-файл в данном случае выступает как конечная форма представления темы оформления. В его структуре фиксируются параметры цветового оформления, фона, акцентных элементов, шрифтовых характеристик, границ и других компонентов интерфейса. При этом выбор конкретных значений определяется входным описанием темы, когнитивной карты и результатом ИИ-генерации.

С практической точки зрения такой механизм позволяет стандартизировать процесс создания темы оформления. Вместо ручного задания большого количества визуальных параметров становится возможным использовать более компактное и понятное описание, после чего система автоматически формирует соответствующую конфигурацию. Это снижает трудоёмкость настройки, уменьшает влияние субъективных решений и обеспечивает более устойчивое соответствие между исходными требованиями и итоговым визуальным результатом.

Практическая реализация предложенного подхода выполнена в виде бота в мессенджере. Когнитивная карта при этом используется для структурирования входных параметров и связи между свойствами визуального оформления.

На вход системе подаётся описание желаемой темы оформления, включающее характеристики, связанные с общим стилем дашборда, его предполагаемым назначением, степенью формальности, особенностями визуальных акцентов и другими параметрами, влияющими на внешний вид интерфейса и т.д. Полученный запрос интерпретируется системой как набор признаков, подлежащих сопоставлению.

Анализ сгенерированного JSON-файла показал, что предложенный подход позволяет формировать темы, в которых отражаются заданные пользователем характеристики, включая палитру, акцентные цвета, параметры теней и скруглений. Вместе с тем генерация темы с помощью ИИ не всегда обеспечивает полное совпадение результата с исходным запросом, поскольку часть параметров интерпретируется вероятностно. Это указывает на практическую применимость подхода при одновременной необходимости дополнительной проверки сгенерированной конфигурации.

Заключение

Таким образом, в работе рассмотрен подход к автоматической стилизации дашбордов, основанный на преобразовании текстового описания темы в JSON-файл конфигурации. Показано, что использование когнитивной карты позволяет формализовать связи между входными характеристиками темы и параметрами визуального оформления, необходимыми для генерации итоговой темы.

В рамках исследования была описана структура когнитивной карты, отражающей влияние пользовательских параметров на свойства интерфейса, а также рассмотрен механизм их преобразования в JSON-представление темы для BI-системы Visiology. Практическая реализация данного подхода выполнена в виде программного средства, встроенного в бота в

мессенджере и обеспечивающего автоматическую генерацию темы оформления по текстовому запросу.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о практической применимости предложенного подхода для снижения объема ручной настройки и повышения согласованности визуальных решений. Дальнейшее развитие работы может быть связано с расширением набора параметров темы, уточнением правил их интерпретации и развитием средств интеллектуальной настройки визуального оформления дашбордов.

Литература

1. Ремарчук В. Н. Информационная аналитика: теория, методология, технологии: учебник для вузов. 4-е изд., стер. Санкт-Петербург: Лань, 2025. 224 с.
2. Емельяненко А. С., Колесник Д. В. Процесс построения когнитивных карт // Вопросы студенческой науки. 2019. № 12(40). С. 309–316. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/protsess-postroeniya-kognitivnyh-kart> (дата обращения: 18.03.2026).
3. Чапля Т. В. Когнитивная карта: чувственно-образное представление о пространстве // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2019. Т. 5. С. 138–144. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kognitivnaya-karta-chuvstvenno-obraznoe-predstavlenie-o-prostranstve> (дата обращения: 18.03.2026).
4. Прикладная аналитика: монография / под ред. А. Р. Бахтизина, Н. И. Ильина. М.: МАКС Пресс, 2025. 672 с.

АРХИТЕКТУРА КРОССПЛАТФОРМЕННОЙ СИСТЕМЫ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ МУЛЬТИМЕДИЙНЫМ КОНТЕНТОМ С ПОДДЕРЖКОЙ ГИБРИДНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ

Л.А. Амерханов ¹, студент

Н.С. Шохинов ¹, студент

Н.Т. Суханова ¹, доцент, канд. пед. наук

¹ *Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет,
Нижний Новгород
nshohinov.2004.sokol@gmail.com*

Аннотация. В статье рассматриваются особенности построения отказоустойчивой системы управления воспроизведением мультимедийного контента на удаленных устройствах. Актуальность работы обусловлена необходимостью обеспечения непрерывности вещания в условиях нестабильности каналов связи, вызванной как техническими, так и внешними факторами. В работе предложена архитектура системы, основанная на клиент-серверной модели с поддержкой гибридного режима работы, которая обеспечивает автономное функционирование клиентских устройств. Реализация системы включает серверную часть на базе FastAPI и клиентское приложение, разработанное с использованием Flutter. Описаны механизмы хранения, синхронизации и воспроизведения контента. Проведено тестирование, подтвердившее работоспособность решения и его устойчивость к сетевым сбоям. Рассмотрены направления дальнейшего развития системы.

Введение

Технологии цифрового информирования (Digital Signage) широко применяются в различных сферах человеческой деятельности: в торговле, сфере услуг, офисных пространствах, транспортной инфраструктуре [1]. Несмотря на востребованность, решения, представленные на рынке, обладают рядом технических ограничений, среди которых ключевыми являются зависимость от стабильного интернет-соединения, сложности масштабирования и высокая стоимость внедрения.

Дополнительной проблемой является зависимость от проприетарного оборудования и внешней инфраструктуры, что снижает гибкость развертывания и увеличивает совокупную стоимость владения системой.

При использовании централизованно управляемых сервисов существенным ограничением являются сетевые сбои: возможные перебои в доступе к сети, нестабильность канала связи, которые могут приводить к недоступности сервиса и задержкам в управлении. В связи с этим требуется разработка решений, способных функционировать в гибридном режиме [2].

Целью данной статьи является рассмотрение возможности разработки кроссплатформенной системы централизованного управления воспроизведением контента (MVP), обеспечивающей гибкое планирование, синхронизацию устройств и надежную работу в гибридном режиме без критической зависимости от канала связи. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ существующих решений в рассматриваемой области;
- определить требования к системе управления мультимедийным контентом, в условиях нестабильного канала связи;
- реализовать механизм управления контентом и расписаниями воспроизведения;
- обеспечить поддержку различных форматов мультимедийного контента;

- провести проверку работоспособности системы.

Основной текст

На современном рынке представлен ряд технических решений в сфере программного обеспечения для управления цифровыми вывесками, однако их применение в универсальных сценариях ограничено. Проприетарные решения, такие как BrightSign, несмотря на высокую надежность, требуют закупки специализированного оборудования. Облачные сервисы, такие как ScreenCloud и Yodeck, обладают удобным и понятным интерфейсом, однако функционально ограничены в условиях нестабильного подключения к интернету и зависят от сторонней инфраструктуры. Платформа Xibo (open source-продукт) требует высокой квалификации для настройки оборудования и имеет некоторые сложности с локализацией и поддержкой в РФ.

Российский рынок цифровых вывесок преимущественно централизован и контролируется крупными платформами и маркетплейсами, где доступ к инфраструктуре предоставляется только в формате размещения рекламы на платной основе. Пользователь не получает доступа к инструментам для самостоятельного управления контентом, а фактически покупает только место в рекламной сетке.

На основе проведенного анализа программных средств можно утверждать, что на рынке программного обеспечения отсутствует сбалансированное отечественное решение, сочетающее аппаратную независимость, гибкое управление, интуитивно понятный интерфейс и полноценную поддержку автономной работы. Это обосновывает необходимость разработки собственной архитектуры.

В этой связи была рассмотрена возможность разработки системы с учетом выявленных недостатков, а именно: требований к надежности, масштабируемости и независимости от конкретного оборудования.

Архитектура разработанного проекта построена по принципу «клиент-сервер» [4] и включает веб-панель для управления экранами и кроссплатформенное клиентское приложение. Серверная часть использует REST API для управления контентом и устройствами. Для оптимизации работы с большими файлами они размещаются в объектном хранилище, совместимом с протоколом S3, тогда как метаданные и расписания хранятся в реляционной базе данных [3]. Клиентское приложение разработано на языке программирования Flutter, за счет чего отпадает необходимость писать отдельное приложение для каждой операционной системы отдельно [6], это приложение отвечает за декодирование и вывод контента. Общая архитектура системы представлена на рисунке 1.

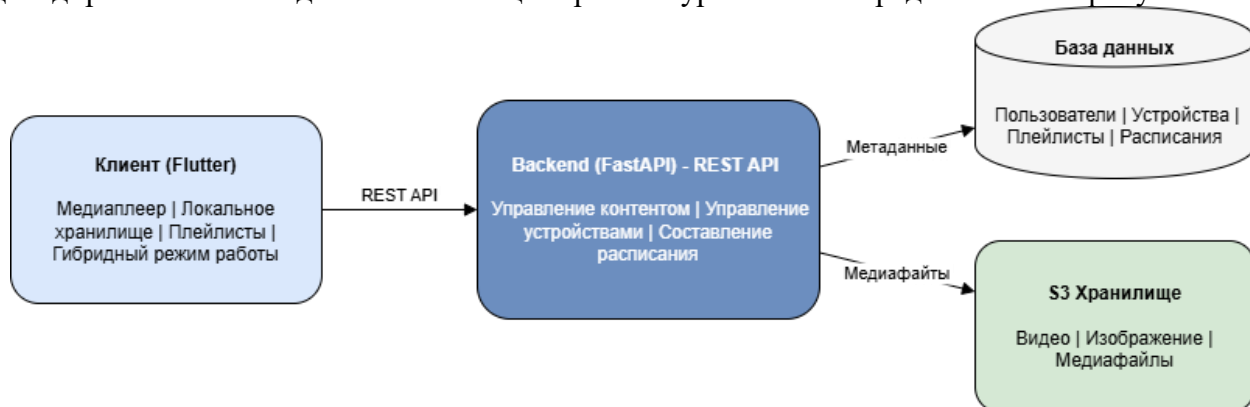


Рис. 1. Общая архитектура системы

Ключевой особенностью разработки является реализация гибридного режима работы. Надежность системы строится на основе локального воспроизведения: клиентское приложение хранит актуальное расписание и контент в локальном хранилище [5]. Синхронизация данных осуществляется через взаимодействие с сервером посредством запросов к API. При отсутствии сетевого соединения воспроизведение продолжается на

основе локальных файлов, что исключает прерывание трансляции. При восстановлении связи происходит фоновая синхронизация и отправка логов.

Для координации работы устройств применяется механизм передачи команд. Синхронизация системного времени на клиентах позволяет обеспечивать одновременный старт контента на группах экранов. Управление расписанием реализовано через алгоритм построения очередей воспроизведения (Playlist Engine), поддерживающий временные интервалы. Интерфейс редактора предоставляет возможность визуального конструирования последовательностей, что снижает требования к квалификации оператора.

В ходе разработки была проведена экспериментальная проверка работоспособности системы, направленная на оценку корректности функционирования основных компонентов. Функциональное тестирование показало успешную реализацию основных компонентов системы: обработку запросов, формирование плейлистов, составление расписания для контента и назначения его клиентам. Воспроизведение на клиентах оставалось стабильным при обрыве соединения, а после восстановления корректно синхронизировалась.

Тестирование на нагрузку серверной части в рамках данной работы не проводилось, однако используемая архитектура и стек решений позволяют предположить возможность обработки значительного числа клиентских подключений.

Преимуществом решения является независимость от конкретного оборудования, что позволяет использовать существующую инфраструктуру заказчика, в отличие от аппаратных плееров. По сравнению с открытыми решениями, разработанная система обладает простым интерфейсом, используются интуитивно понятные шаблоны взаимодействия. Поддержка мультимедийного контента на текущем этапе реализована в базовом объеме. Кроме того, текущая реализация бэкенда на языке Python может накладывать ограничения на максимальную пропускную способность сервера, что связано с особенностями интерпретируемого языка и используемой архитектуре.

Выводы

В рамках данной работы была разработана и протестирована архитектура кроссплатформенной системы управления мультимедийным контентом. Цель исследования, заключающаяся в создании решения с поддержкой гибридного режима работы и синхронизации, была достигнута. Все поставленные задачи, включая реализацию серверной части, клиентского приложения и механизма планирования, были решены.

Проведенное исследование показало возможность дальнейшего развития системы. В качестве перспектив планируется расширение поддерживаемых форматов контента, включая документы PPTX, PDF и потоковые трансляции. Также рассматривается возможность оптимизации серверной части путем миграции бэкенда на язык Go, что позволит устранить выявленные ограничения производительности и повысить масштабируемость платформы.

Литература

1. Digital Signage Market Size & Share Analysis - Growth Trends and Forecast (2026–2031) [Электронный ресурс] // Mordor Intelligence. URL: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/digital-signage-market-industry> (дата обращения: 21.03.2026).
2. Гурин А. В., Михайлов Б. А. Архитектура и интеграция приложений для автоматизации Smart-дома на основе IoT [Электронный ресурс] // Universum: технические науки. 2025. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/arhitektura-i-integratsiya-prilozheniy-dlya-avtomatizatsii-smart-doma-na-osnove-iot> (дата обращения: 31.03.2026).
3. Коростелев Д. А., Подвесовский А. Г., Захарова А. А. Организация хранения данных функционирования объектов киберфизических систем [Электронный ресурс] // Программные продукты и системы. 2024. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/organizatsiya-hraneniya-dannyh-funktsionirovaniya-obektov-kiBERfizicheskikh-sistem> (дата обращения: 28.03.2026).
4. Лиманова Н. И., Селезнев И. А. Анализ эффективности клиент-серверной архитектуры [Электронный ресурс] // Бюллетень науки и практики. 2022. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-effektivnosti-klient-servernoy-arhitektury> (дата обращения: 28.03.2026).
5. Михайлов Б. А., Фроликов Е. А. Создание отказоустойчивых веб-приложений: стратегии обеспечения надежности и восстановления после сбоев [Электронный ресурс] // Вестник науки. 2025. URL:

<https://cyberleninka.ru/article/n/sozdanie-otkazoustoichivyh-veb-prilozheniy-strategii-obespecheniya-nadezhnosti-i-vostranovleniya-posle-sboev> (дата обращения: 25.03.2026).

6. Мухамедин А. А., Абитова Г. А. Исследование React Native и Flutter, кроссплатформенных фреймворков для мобильных приложений [Электронный ресурс] // Вестник Университета Шакарима. Серия технические науки. 2024. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-react-native-i-flutter-krossplatformennyh-freymvorkov-dlya-mobilnyh-prilozheniy> (дата обращения: 22.03.2026).

КРОСС-ЯЗЫКОВОЕ ММРІ-ТЕСТИРОВАНИЕ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ КАК МЕТОДИЧЕСКИЙ МОДУЛЬ ПОВЕДЕНЧЕСКОГО ФЕНОТИПИРОВАНИЯ В КОГНИТИВНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОЦЕНКЕ ИХ ОБУЧЕНИЯ

А.Г. Фомин ¹, доцент, д-р фил. наук

С.Р. Юников ¹, аспирант

¹ *Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва*
unikormailgate.ru@mail.ru

Аннотация. В статье Mini-Mult / СМОЛ рассматривается как методический модуль когнитивно-экспериментальной оценки больших языковых моделей в логике их поведенческого фенотипирования. На материале кросс-языкового тестирования Claude Opus 4.5, Gemini 3 Flash Preview, GPT-5.2 и Grok-4.1-fast на десяти языках показано, что психометрические шкалы могут использоваться не для клинической диагностики, а как формализованный язык описания устойчивых паттернов ответа. Установлены межмодельные различия response strategy, воспроизводимости и кросс-языковой устойчивости, что подтверждает применимость ММРІ-подхода для поведенческого аудита и анализа эффектов постобучения.

Введение

В современной исследовательской повестке, связанной с оценкой больших языковых моделей, всё более очевидным становится ограничение подходов, ориентированных исключительно на метрики качества, точности или бенчмарковой результативности. Подобные методы позволяют судить о том, насколько успешно модель решает заданную задачу, однако существенно хуже описывают то, каким образом она реагирует в серии стандартизированных ситуаций, насколько воспроизводима её поведенческая конфигурация и в какой степени на неё воздействуют язык запроса, параметры генерации и особенности постобучения. В связи с этим в исследованиях LLM усиливается интерес к поведенческому измерению их функционирования, в рамках которого модель рассматривается не как носитель субъективности, а как вероятностная нейросетевая система, демонстрирующая наблюдаемые и сопоставимые паттерны ответа [4–6].

Именно в этой логике особое значение приобретает поведенческое фенотипирование, под которым в рамках настоящей работы понимается методологический подход к выявлению, описанию и сопоставлению устойчивых конфигураций ответного поведения большой языковой модели в контролируемых экспериментальных условиях. Основное отличие данного подхода от традиционной оценки на основе задач заключается в том, что объектом анализа становится не единичный правильный ответ, а повторяющаяся стратегия ответов на серию формализованных стимулов. Следовательно, исследовательский интерес смещается от продуктивности к политике ответов, от точности к воспроизводимости, от задачной эффективности к профилю поведенческой устойчивости.

Вместе с этим возникает вопрос о подборе инструментов, способных зафиксировать такие различия. Представляется целесообразным использовать для этой цели стандартизированные психометрические опросники, но не в их клиническом предназначении, а как формализованные стимульные системы, задающие воспроизводимое пространство вербальных реакций. Подобная перспектива уже получила обоснование в исследованиях AI psychometrics, где показано, что психометрические инструменты могут быть адаптированы для диагностики не психического состояния модели, а устойчивых аналогов её поведенческого профиля [4; 5]. Наряду с этим для LLM принципиально важным оказывается кросс-языковой аспект. Современные исследования демонстрируют, что язык

влияет не только на форму ответа, но и на его прагматическую структуру, нормативность, отказное поведение и стратегию взаимодействия с инструкцией [6–8]. Следовательно, межъязыковое предъявление стандартизированного опросника может быть использовано как средство анализа того, насколько единым является поведенческий профиль модели и в какой мере он модифицируется языком.

Цель настоящей статьи состоит в том, чтобы обосновать кросс-языковое ММРІ-тестирование в сокращённой форме Mini-Mult / СМОЛ как методический модуль поведенческого фенотипирования больших языковых моделей в системе их когнитивно-экспериментальной оценки и показать на эмпирическом материале, какие межмодельные различия стратегий ответа выявляются при применении данного подхода.

Основной текст

В качестве инструментальной базы использована сокращённая форма Миннесотского многоаспектного личностного опросника – Mini-Mult, известная в русскоязычной традиции как СМОЛ. Данная версия включает 71 утверждение, три контрольные шкалы валидности и восемь клинических шкал [2; 3]. В рамках исследования шкалы интерпретируются не как индикаторы психологического состояния, а как стандартизированный язык описания устойчивых паттернов ответа модели при серийном предъявлении однотипных стимулов. Соответственно, получаемые показатели рассматриваются как дескрипторы стилей ответа, а не как основания для клинических выводов.

Эмпирическую базу составили результаты тестирования четырёх больших языковых моделей: Claude Opus 4.5, Gemini 3 Flash Preview, GPT-5.2 и Grok-4.1-fast. Эксперимент проводился на десяти языках: арабском, бенгальском, английском, испанском, французском, хинди, японском, португальском, русском и китайском. Для каждого сочетания «модель – язык» выполнялось по пять повторных прогонов. Тестирование осуществлялось в batch-режиме, при котором все 71 утверждение передавались модели в рамках одного запроса; ответы фиксировались в бинарном формате, эквивалентном вариантам «Да / Нет». В исследовательском протоколе использовался параметр temperature = 0.7, порог валидности прогона составлял не менее 50 содержательных ответов из 71, а перевод сырых баллов в Т-баллы осуществлялся по мужским нормативам с применением стандартной К-коррекции для соответствующих шкал [2; 3].

Аналитическая схема включала три взаимосвязанных уровня. Во-первых, рассчитывались усреднённые Т-баллы по контрольным и клиническим шкалам. Во-вторых, определялась межзапусковая согласованность как доля вопросов, на которые модель отвечала одинаково во всех повторях. В-третьих, оценивалась кросс-языковая дивергенция ΔТ как разность между максимальным и минимальным Т-баллом по каждому показателю среди десяти языков. Такая конструкция позволяла одновременно фиксировать амплитуду профиля, его воспроизводимость и чувствительность к языковому каналу предъявления.

Проведённый анализ показал, что исследованные модели образуют четыре различающихся конфигурации стратегии ответов, отличающиеся как по амплитуде профиля, так и по степени его кросс-языковой устойчивости, рисунки 1-4.

claude-opus-4.5 – кросс-языковое сравнение

Шкала	Название	Арабский	Бенгаль...	Английс...	Испанск...	Француз...	Хинди	Японский	Португал...	Русский	Китайск...	ΔТ
L	Ложь	46	38	46	46	46	46	38	46	38	38	8
F	Достоверность	45	44±2	42±2	45	45	45	45	45	45	45	3
K	Коррекция	51	44±4	52±5	50±2	52±2	45	51	42	48	48	10
Is	Ипохондрия	39	35±2	40±3	39±0	40±1	36	39	34	38	38	6
D	Депрессия	31	28	28	28	31	28	28	28	31	31	3
Hu	Истерия	37	34	33±2	37	41	34	41	34	34	41	8
Pd	Психопатия	30	27±4	35±5	29±1	33±4	27	35	25	28	28	10
Pa	Паранойальность	38	44	33	48±3	38	38	50	38	33	44	17
Pt	Психастения	32	26±5	33±7	30±2	34±2	24	36	20	28	36	16
Sc	Шизоидность	30	25±4	30±6	28±2	31±2	23	37	19	30	33	18
Ma	Гипомания	46	41±1	47±1	46±0	44±3	37	39	42	51	58	21
	Прогонов	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
	Согласов.	100%	99%	99%	99%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	

Рис. 1. Кросс языковое сравнение Claude Opus 4.5

geminі-3-flash-preview – кросс-языковое сравнение												
Шкала	Название	Арабский	Бенгаль...	Английс...	Испанск...	Француз...	Хинди	Японский	Португал...	Русский	Китайск...	ΔT
L	Ложь	46	43±4	46	46	46	49±4	38	46	46	38	11
F	Достоверность	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	0
K	Коррекция	56±2	56±4	53±1	56±5	58±2	55±5	55±4	55±5	59±5	53±3	7
Hs	Ипохондрия	42±1	42±3	41±1	43±3	43±1	41±3	42±2	41±3	44±3	40±2	4
D	Депрессия	28	25±2	28	29±1	29±1	28±4	26±2	29±2	29±3	26±2	4
Hу	Истерия	39±2	38±4	36±1	40±3	40±2	38±6	40±3	37±4	40±3	36±3	4
Pd	Психопатия	36±4	38±3	37±1	38±7	40±3	37±3	38±3	38±5	43±6	41±1	7
Pa	Паранойальность	44	40±3	38	43±3	44±4	40±3	45±3	41±6	44±7	45±5	7
Pt	Психастения	38±2	36±4	35±2	38±6	41±3	37±7	39±4	36±8	42±8	38±5	6
Sc	Шизоидность	35±2	37±4	32±1	36±6	38±3	34±6	39±5	34±6	40±6	39±3	7
Ma	Гипомания	35±1	40±4	35±2	38±4	36±1	37±2	39±3	40±4	38±1	36±3	5
Прогонов		5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
Согласов.		99%	98%	99%	98%	99%	98%	98%	97%	98%	98%	

Рис. 2. Кросс языковое сравнение Gemini 3 Flash Preview

gpt-5_2 – кросс-языковое сравнение												
Шкала	Название	Арабский	Бенгаль...	Английс...	Испанск...	Француз...	Хинди	Японский	Португал...	Русский	Китайск...	ΔT
L	Ложь	79	79	79	74±11	77±4	79	79	79	79	79	5
F	Достоверность	50	50	50	49±2	50	50	50	50	50	50	1
K	Коррекция	74	74	74	71±8	72±4	74	74	74	74	74	3
Hs	Ипохондрия	69	69	69	64±12	68±2	69	69	69	69	69	5
D	Депрессия	65	65	65	60±12	64±2	65	65	65	65	65	5
Hу	Истерия	75	75	75	68±15	74±3	75	75	75	75	75	7
Pd	Психопатия	69	69	69	64±12	68±3	69	69	69	69	69	5
Pa	Паранойальность	50	50	50	48±5	48±5	50	50	50	50	50	2
Pt	Психастения	72	72	72	66±14	69±7	72	72	72	72	72	6
Sc	Шизоидность	65	65	65	59±12	62±6	65	65	65	65	65	6
Ma	Гипомания	37	37	37	37±0	39±4	37	37	37	37	37	2
Прогонов		3	5	5	5	5	5	3	5	5	5	
Согласов.		100%	100%	100%	94%	98%	100%	100%	100%	100%	100%	

Рис. 3. Кросс языковое сравнение GPT-5.2

grok-4_1-fast – кросс-языковое сравнение												
Шкала	Название	Арабский	Бенгаль...	Английс...	Испанск...	Француз...	Хинди	Японский	Португал...	Русский	Китайск...	ΔT
L	Ложь	56±10	59±7	48±4	52±4	46	64±11	43±7	49±7	46	44±7	21
F	Достоверность	42±2	42±2	41	41	41	43±2	41	41	41	41	2
K	Коррекция	63±6	54±3	52±3	59±4	53±3	56±2	54±11	48±3	53±4	52±7	15
Hs	Ипохондрия	46±3	41±2	40±2	44±2	40±1	42±1	41±6	38±3	40±2	40±4	8
D	Депрессия	37±4	29±1	25±3	32±3	27±2	31±4	28±4	27±5	27±3	31±3	11
Hу	Истерия	41±6	35±6	31±3	38±4	30±2	38±3	36±8	31±7	32±2	31±4	10
Pd	Психопатия	46±4	33±3	38±4	43±0	42±3	40±3	31±12	28±6	39±4	34±9	18
Pa	Паранойальность	39±8	33±6	32±3	39±8	33±4	34±2	43±5	35±3	31±3	35±5	12
Pt	Психастения	48±8	32±4	31±3	40±6	34±4	35±3	38±11	28±4	31±5	34±7	20
Sc	Шизоидность	45±7	33±4	31±4	39±5	32±3	36±3	36±11	26±4	32±5	33±7	18
Ma	Гипомания	46±6	43±2	49±4	40±5	53±1	38±3	46±2	45±7	44±4	49±4	15
Прогонов		5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
Согласов.		95%	97%	97%	96%	98%	97%	94%	96%	96%	95%	

Рис. 4. Кросс языковое сравнение Grok-4.1-fast

Наиболее жёсткий и наиболее инвариантный профиль продемонстрировала модель GPT-5.2. Для неё характерны стабильно высокие значения по шкалам L, K, Hу, Hs, Pt, D, Pd и Sc: в большинстве языковых версий L удерживается на уровне 79 Т-баллов, K – 74, Hу – 75, Pt – 72, Hs и Pd – 69, D и Sc – 65. При этом межязыковые расхождения остаются минимальными: диапазон ΔT по отдельным шкалам в основном лежит в интервале от 1 до 7 баллов, а межзапусковая согласованность по большинству языков достигает 100 %. Даже в тех случаях, где наблюдается частичное снижение амплитуды, прежде всего в испанской и французской версиях, общий рисунок профиля сохраняется. Такая конфигурация может интерпретироваться как высоко стандартизированная политика ответа с выраженным самоконтролем, защитностью и крайне слабой зависимостью от языка предъявления.

Иной тип устойчивости фиксируется у Gemini 3 Flash Preview. Для данной модели характерен сравнительно низкоамплитудный и нормативно ориентированный профиль. Шкала F остаётся практически инвариантной на уровне 41 Т-балла во всех языках, D удерживается в диапазоне 25 – 29, Hу – 36–40, Hs – 40–44, Ma – 35–40, а большая часть остальных шкал также не выходит за пределы умеренно-нормативного интервала. Кросс-

языковая дивергенция здесь невелика: по большинству шкал она составляет от 4 до 7 баллов, причём выраженный разброс фиксируется главным образом по L, где ΔT достигает 11. Межзапусковая согласованность находится на уровне 97–99 %. Следовательно, устойчивость Gemini обеспечивается не через жёсткую ригидность, как у GPT-5.2, а через сдержанную и сглаженную конфигурацию ответа, минимизирующую крайние значения и резкие межязыковые сдвиги.

Claude Opus 4.5 занимает промежуточное положение, однако именно у этой модели наиболее отчётливо проявляется языковая модуляция ряда стратегически значимых шкал. Базовые показатели по L, F, Hs, D и Hy остаются умеренными: L варьирует от 38 до 46, F – от 42 до 45, D – от 28 до 31. Вместе с этим по шкалам Pa, Pt, Sc и особенно Ma наблюдается заметная дивергенция: для Pa она достигает 17 баллов, для Pt – 16, для Sc – 18, для Ma – 21. На русском и китайском языках шкала Ma существенно выше, чем в хинди и португалоязычной версиях; в японском варианте возрастает уровень Pa, Pt и Sc. При этом межзапусковая согласованность сохраняется на уровне 99–100 %, что указывает не на случайный шум, а на воспроизводимую зависимость response style от языка предъявления. Для Claude, таким образом, характерен не единый кросс-языково инвариантный профиль, а языково чувствительный фенотип, в котором базовая нормативная рамка остаётся достаточно устойчивой, тогда как параметры настороженности, когнитивной напряжённости и поведенческой активации варьируют заметно сильнее.

Максимальную вариативность демонстрирует Grok-4.1-fast. Именно у этой модели зафиксированы наибольшие значения ΔT по ряду ключевых шкал: L – 21, K – 15, Pd – 18, Pt – 20, Sc – 18, Ma – 15. Межзапусковая согласованность составляет 94–98 %, что также является самым низким диапазоном среди всех исследованных моделей. Наряду с этим в ряде языков наблюдается и повышенная внутримodelьная вариативность между повторами. Особенно показательным, что в одной части языков профиль Grok выглядит умеренно-сдержанным, а в другой – значительно более напряжённым и амплитудным. На поведенческом уровне это может соответствовать наименее стабилизированной политике ответов, для которой язык выступает сильным фактором перенастройки стратегии ответа. Следовательно, Grok характеризуется наиболее выраженной фенотипической пластичностью, но одновременно и наименьшей воспроизводимостью.

Сравнительный анализ позволяет сделать несколько методологически значимых выводов. Прежде всего показано, что кросс-языковая устойчивость не сводится к одному типу конфигурации. В случае GPT-5.2 она достигается за счёт жёсткой и почти ригидной инвариантности профиля; в случае Gemini 3 Flash Preview – за счёт его низкой амплитуды и сглаженности; в случае Claude Opus 4.5 устойчивой остаётся лишь базовая рамка, тогда как отдельные стратегические шкалы существенно зависят от языка; у Grok-4.1-fast, напротив, фиксируется максимально широкий диапазон языково обусловленных сдвигов.

В связи с этим язык запроса следует рассматривать не только как поверхность текстовой репрезентации, но и как фактор модуляции поведенческого фенотипа модели. Иначе говоря, смена языка в стандартизированном протоколе способна изменять не просто словесную оболочку ответа, а его вероятностную организацию, степень нормативности, защитности, осторожности и вариативности. Это согласуется с более широкими данными о том, что межязыковые различия в LLM проявляются на уровне продуктивности, прагматики и безопасности поведения [6–8].

Полученные результаты позволяют уточнить и статус психометрических методик в исследованиях искусственного интеллекта. Их ценность состоит не в попытке «измерить личность» модели, а в возможности получить воспроизводимое описание её стратегии ответов в стандартизированном пространстве стимулов. В таком прочтении MMPI / Mini-Mult выступает как инструмент когнитивно-экспериментальной типизации поведения LLM. Особенно продуктивным это оказывается в сопоставительных исследованиях, где необходимо различать модели не только по качеству ответа, но и по степени поведенческой стабильности, чувствительности к языку и характеру постобученного ограничения.

С прикладной точки зрения данный подход представляется значимым для корпоративных, аналитических и регламентных сценариев, в которых критичны не только содержательная корректность ответа, но и воспроизводимость поведенческой политики модели в многоязычной среде. Модель с минимальной кросс-языковой дивергенцией и высокой межзапусковой согласованностью предпочтительна там, где важны предсказуемость и стандартизация. Напротив, модель с выраженной языковой модуляцией профиля требует дополнительного аудита перед использованием в сценариях, чувствительных к нормативности и стабильности коммуникации.

Заключение

Таким образом, кросс-языковое MMPI-тестирование в формате Mini-Mult / СМОЛ может рассматриваться как продуктивный методический модуль поведенческого фенотипирования больших языковых моделей в системе их когнитивно-экспериментальной оценки. Его основное достоинство заключается в том, что он переводит анализ модели из плоскости единичного ответа в плоскость серийно наблюдаемой и количественно описываемой конфигурации реакций.

Проведённое исследование показало, что модели, сопоставимые по общему классу и назначению, могут заметно различаться по типу стратегий ответа. GPT-5.2 демонстрирует наиболее жёсткий и кросс-языково устойчивый профиль; Gemini 3 Flash Preview – наиболее сдержанную и нормативную конфигурацию; Claude Opus 4.5 – структурированную языковую модуляцию стратегических шкал; Grok-4.1-fast – наибольшую межязыковую и межзапусковую вариативность. Следовательно, поведенческий профиль модели определяется не единичным ответом, а серией стандартизированных реакций, в которых проявляются эффекты архитектуры, обучающих данных, постобучения и языкового канала взаимодействия.

Литература

1. Hathaway S. R., McKinley J. C. The Minnesota Multiphasic Personality Inventory. Rev. ed. Minneapolis: University of Minnesota Press, 1943.
2. Kincannon J. C. Prediction of the Standard MMPI Scale Scores from 71 Items: The Mini-Mult // Journal of Consulting and Clinical Psychology. 1968. Vol. 32. No. 3. P. 319–325.
3. Собчик Л. Н. Стандартизированный многофакторный метод исследования личности СМИЛ. М.: Речь, 2003.
4. Pellert M., Lechner C. M., Wagner C., Rammstedt B., Strohmaier M. AI Psychometrics: Assessing the Psychological Profiles of Large Language Models Through Psychometric Inventories // Perspectives on Psychological Science. 2024. Vol. 19. No. 5. P. 808–826.
5. Serapio-García G., Safdari M., Crepy C., Sun L., Fitz S., Romero P., Abdulhai M., Faust A., Matarić M. Personality Traits in Large Language Models // arXiv. 2023. arXiv:2307.00184.
6. Qin L., Chen Q., Zhou Y., Chen Z., Li Y., Liao L., Li M., Che W., Yu P. S. A Survey of Multilingual Large Language Models // Patterns. 2025. Vol. 6. No. 1. Article 101118.
7. Yin Z., Wang H., Horio K., Kawahara D., Sekine S. Should We Respect LLMs? A Cross-Lingual Study on the Influence of Prompt Politeness on LLM Performance // Proceedings of the Second Workshop on Social Influence in Conversations. 2024. P. 9–35.
8. Wang X., Wang M., Liu Y., Schütze H., Plank B. Refusal Direction is Universal Across Safety-Aligned Languages // arXiv. 2025. arXiv:2505.17306.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ НА СПУТНИКОВЫХ СНИМКАХ В СИСТЕМАХ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ

Е.В. Попов ¹, профессор, д-р техн. наук

П.В. Юрченко ¹, аспирант

*¹Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет,
Нижний Новгород
pavel-yurchenko@list.ru*

Аннотация. Визуализация изображений труднодоступных объектов является одной из актуальных задач, успешному решению которых способствует применение систем машинного зрения. Среди существующих методов искусственного интеллекта, применяемых в системах распознавания и визуализации объектов на спутниковых снимках, выделены наиболее востребованные в условиях конкретного исследования. Описан используемый комплексный подход, сочетающий нейросетевые технологии и методы геометрического моделирования, приведено его поэтапное описание. Итоговые изображения распознанных объектов могут использоваться для подготовки графических материалов в геоинформационных системах.

Введение

Методы интеллектуальной обработки визуальной информации непосредственно применяются во множестве важных областей человеческой деятельности. Медицина, искусство, обеспечение безопасности физических и виртуальных данных, градостроительство, сельское хозяйство, военная сфера – все это те области, где в настоящее время широко применяются системы машинного зрения, в основе работы которых лежат методы интеллектуального распознавания изображений и специфические методы работы с ними, соответствующие конкретной прикладной задаче. Начав свое развитие в 70-80-х годах XX века, в настоящее время они являются многофункциональными системами, используемыми при решении задач распознавания объектов, в том числе, в режиме реального времени. Системы машинного зрения находят применение в контроле производственных процессов, обнаружении и распознавании целевых объектов, совмещении реального и виртуального изображения, созданного по цифровой карте местности.

Появление геоинформационных систем открыло новые возможности в обработке данных дистанционного зондирования Земли, применяемых при работе с труднодоступными объектами, такими как крупные лесные массивы. Данные объекты представляют собой значительную экономическую и биологическую ценность в народном хозяйстве. Вместе с тем зачастую для оценки их реального состояния при использовании только наземных методов работы приходится тратить большое количество времени и усилий специалистов. Очевидно, что в условиях необходимости получения оперативной информации данный процесс требует иных подходов, таких как комплексное применение методов интеллектуальной обработки изображений и геоинформационных технологий.

В настоящее время теория распознавания объектов на снимках существенно обогатилась такими методами, как нейросетевые алгоритмы различной архитектуры и сложности [1, 2, 3, 4], а также другие методы машинного обучения, например Random Forest [5]. Существуют открытые динамические модели, основанные на сверточных нейронных сетях, позволяющие практически в режиме реального времени просматривать интересные исследователя территории, отображенные на спутниковых снимках, которые предварительно проходят процедуры коррекции от облаков и их теней, атмосферную коррекцию и координатную привязку [6]. Очевидно, что не смотря на множество положительных

моментов, все перечисленные подходы, содержащие в основе интеллектуальные методы распознавания различных объектов на спутниковых снимках, требуют существенных ресурсных затрат, что не всегда оправдано и возможно в условиях объективных ограничений: материальных, кадровых, информационных. Поэтому возникает необходимость применять комплексный подход, который минимизирует перечисленные затраты и позволяет визуализировать распознанные на снимках изображения.

Материалы и методы исследования

Анализ спутниковых снимков проводится с целью распознавания на них природных объектов или объектов антропогенного происхождения и использования полученных данных для аналитики и прогноза. В данном исследовании были использованы снимки, полученные со спутника Landsat-8 в августе 2024 года, и размещенные в открытом доступе. Предмет исследования - территория Большеболдинского округа Нижегородской области и частично прилегающие территории. В качестве основных объектов, выбранных для интеллектуального распознавания, выступают лесные массивы, которыми богаты данные земли. Был отобран снимок с наименьшей облачностью над исследуемой территорией, который в последствии был собран из отдельных каналов в среде открытой геоинформационной системы QGIS. Затем снимок был подвергнут геометрической коррекции и координатной привязке средствами QGIS.

Модель архитектуры алгоритмов комплексного приложения с указанием средств реализации и детализацией работ представлена на рис. 1. Модуль 1 предполагает применение методов машинного обучения, в данном случае, нейросетевого алгоритма. Модуль 2 выполняет попиксельное сопоставление полученного результата предсказания нейросети, осуществляя независимую оценку точности работы алгоритма первого модуля. Модуль 3 выполняет векторизацию распознанного фрагмента, в результате чего формируется векторный слой, содержащий изучаемые объекты будущей карты исследуемой территории.

На языке Python была спроектирована нейронная сеть прямого распространения, основанная на принципе многослойного персептрона, реализующего алгоритм обратного распространения ошибки [7]. В целом, подбор значений параметров нейросети осуществлялся эмпирически, в результате множества экспериментальных запусков. В итоговом варианте были использованы два скрытых слоя, первый из которых имел четырнадцать входных узлов, второй два входных узла, выходные данные выводили категоризированный результат, соответствующий дихотомической классификации пикселей изучаемого фрагмента. Таким образом, весь растр, подаваемый в нейросеть для реализации ее предсказания, в результате был размечен по принципу «лес – не-лес». При каждом запуске алгоритма были рассчитаны значения метрических показателей обучения нейросети: Accuracy – доля правильных ответов среди всех предсказанных; P-Score – точность предсказаний нейросети и R-Score – полнота.

Количество эпох обучения нейросети также подбиралось эмпирическим путем, итоговая версия алгоритма работала с четырнадцатью эпохами. При достижении наиболее стабильного результата в показателях обучения значение подбираемого параметра нейросети фиксировалось и выполнялось итоговое предсказание (табл. 1).

Как следует из анализа результатов эксперимента, наиболее стабильные показатели демонстрировал алгоритм со значениями количества эпох обучения четырнадцать при двух или четырех последовательных экспериментах при настройке обучения. Эта конфигурация демонстрирует и наиболее достоверный результат предсказания при сравнении с эталонными значениями. Анализ полученных результатов очевидно показал, что стандартные метрики обучения нейросетевого алгоритма при экспериментально отобранных итоговых значениях параметров имели следующие показатели: точность (P-Score) - 0,97, полнота (R-Score) - 0,99, доля правильных ответов среди всех предсказанных (Accuracy) - 0,98, стандартное отклонение варьировалось в диапазоне от 0,0001 до 0,0008.



Рис. 1. Архитектура комплексного приложения

Таблица 1 – Показатели обучения нейросетевого алгоритма

Количество эпох обучения	Количество экспериментов при обучении	P-Score	R-Score	Accuracy	Standard Deviation
12	2	0,979	0,991	0,97555	0,0022574
12	3	0,978	0,992	0,97610	0,0022967
12	4	0,980	0,991	0,97064	0,0080614
12	6	0,974	0,994	0,97608	0,0010141
14	2	0,974	0,994	0,97517	0,0008228
14	2	0,977	0,992	0,97681	0,0001899
14	2	0,969	0,996	0,97327	0,0001055
14	4	0,983	0,987	0,97712	0,0017349
14	4	0,980	0,991	0,97759	0,0011852

Выходной результат Модуля 1 поступает на вход Модуля 2, где производится его попиксельное сравнение с контрольным размеченным фрагментом (при наличии). Как правило, показатели качества обучения нейросети, найденные по окончании процесса обучения, бывают несколько завышены, при этом предсказание ее носит вероятностный характер. Проведенные эксперименты по сопоставлению с контрольным фрагментом показали, что совпадение распознанных растров с ним составило порядка 89-95% при различных конфигурациях параметров нейросети, что подтверждает завышение показателей обучения, и, тем не менее, позволяет считать удовлетворительным полученный результат.

Перспективным итогом исследования служит выходной результат Модуля 3, в рамках которого будет производиться визуализация распознанных объектов, построение их контуров и площадей с применением геометрического моделирования. В частности, рассматриваются такие хорошо зарекомендовавшие себя методы векторизации как метод Кенни для векторизации границ выделенных объектов, метод Хаффа, методы сплайновой векторизации, основанные на применении кривых Безье (рис. 2). Указанные методы проходят апробирование и изучаются на предмет производительности и эффективности для принятия обоснованного решения об итоговой применимости в рамках исследования.

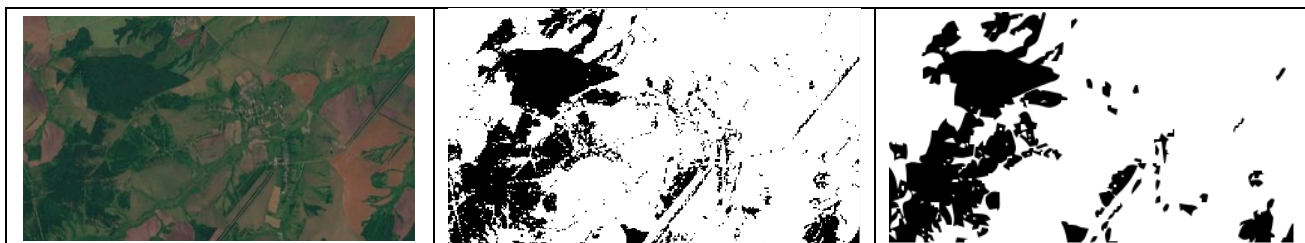


Рис. 2. Результат распознавания лесных массивов и их визуализации с применением кривых Безье

Заключение

Результаты текущего этапа исследования позволили более точно визуализировать границы изучаемых площадных объектов, распознанных на космоснимке посредством применения нейросетевого алгоритма. Проводимое исследование имеет прикладное значение, суть которого состоит в создании автоматизированной среды изучения природных ресурсов на основе геоинформационного анализа и методов машинного обучения, что позволит в дальнейшем решать актуальные задачи территориального планирования Большеболдинского округа. Дальнейшее развитие связано с решением задач обобщения, повышения точности и интерпретируемости моделей, что откроет путь для их широкого внедрения в критически важные приложения автоматизации и анализа изображений.

Литература

1. Власов, С. О. Исследование и разработка гибридных алгоритмов распознавания объектов на основе зрительных данных: дис. кан. физ.-мат. наук / С. О. Власов. - Текст: непосредственный // Москва. – 2025. – 107 с.
2. О классификации космических снимков Santinel-2 нейронной сетью ResNet-50 / И.В.Бычков, Г.М.Ружников [и др.]. - Компьютерная оптика, 2023, том 47, №3 DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1216.
3. Ньян Л. Т. Классификация гиперспектральных данных дистанционного зондирования Земли с использованием комбинированных 3D-2D сверточных нейронных сетей // Л.Т. Ньян, А.И. Гаврилов, М.Ч. До. - Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Приборостроение. 2022.- №.1. - С.100 118.
4. Хроль, Е. В., Шаронова, К. С. (2023). Распознавание изображений с помощью искусственного интеллекта. Современные инновации, системы и технологии - Modern Innovations, Systems and Technologies, 3(4), 0311–0321. <https://doi.org/10.47813/2782-2818-2023-3-4-0311-0321>.
5. Rufaioğlu, S. B., Bilgili, A. V., Savaşlı, E., Özberk, İ., Aydemir, S., Ismael, A. M., Kaya, Y., & Matos-Carvalho, J. P. (2025). Sensor-Based Yield Prediction in Durum Wheat Under Semi-Arid Conditions Using Machine Learning Across Zadoks Growth Stages. *Remote Sensing*, 17(14), 2416. <https://doi.org/10.3390/rs17142416>.
6. Brown, C.F., Brumby, S.P., Guzder-Williams, B. et al. Dynamic World, Near real-time global 10 m land use land cover mapping. *Sci Data* 9, 251 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01307-4>.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025662280 Российская Федерация. Программный комплекс ClassAlgo: заявл. 24.04.2025: опубл. 19.05.2025 / Е. В. Попов, П. В. Юрченко; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет».

СИНТЕЗ АДАПТИВНЫХ МЕТОДОВ ДЕТЕКЦИИ КОЛЛИЗИЙ ДЛЯ РЕАЛИСТИЧНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОБЪЕКТОВ В ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ

А.А. Уманский ¹, стажер-исследователь

Н.Т. Суханова ², доцент, канд. пед. наук

А.Д. Тарасов ¹, инженер-программист 3 категории

Е.В. Терехин ¹, начальник научно-исследовательской группы

¹ РФЯЦ-ВНИИЭФ, Нижний Новгород

*² Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет,
Нижний Новгород
tothbedg@yandex.ru*

Аннотация. В статье рассматриваются методы детекции столкновений, которые могут быть использованы для проверки столкновений между объектами в виртуальной реальности в компьютерных играх, моделировании, дизайне и других областях. Описываются методы определения коллизий между: двумя ограничивающими сферами, двумя ориентированными ограничивающими параллелепипедами, ограничивающей сферой и ориентированным ограничивающим параллелепипедом, двумя треугольниками в трехмерном пространстве. Для улучшения производительности приложений, можно дополнительно использовать иерархию ограничивающих объемов или K-D дерева, которые позволяют уменьшить количество треугольников для дальнейшей проверки на пересечение.

Введение

Виртуальная реальность в современном мире стремительно интегрируется в различные сферы человеческой деятельности и в том числе в высокотехнологичные отрасли. Для них визуализация становится инструментом принятия решений. При этом к компьютерной графике в этих отраслях предъявляются особые требования, которые выходят за рамки визуальной эстетики. Она перестает быть декоративной и требует математически точное отображение объектов для их реалистичности. Связующим звеном становится синтез адаптивных методов детекции коллизий, поскольку он дает возможность объединить сложную геометрию различных промышленных объектов с производительностью в рамках режима реального времени, которое возможно для различных VR-систем.

Проблемам внедрения виртуальной реальности в различные высокотехнологичные сферы посвящено большое количество работ. В статье Гулова Т.У., Иванченко С.А., Сысоева Н.Д. [2] рассматриваются принципы работы, преимущества и недостатки VR, однако не рассматриваются способы обнаружения столкновений объектов. Исследование Дорохова Д.С., Овчинникова И.И. [3] показывают программные комплексы, осуществляющие совместную работу VR программ с продуктами проектирования информационной модели здания, однако авторы не уделяют внимания системе коллизий. Зеленский М.М., Рева С.А., Шадеркина А.И. [4] описывают возможности применения VR в обучении медицинского персонала, однако у них нет описания системы, отвечающей за определение пересечений VR-объектов. В работе Кубанова А.А., Махаковой Ю.Б., Астаховой И.В. [5] предложен способ интеграции виртуальной реальности в программы обучения медицинских работников, однако не рассмотрена проблема коллизии объектов в VR. Москаленко Д.А., Василенко В.А., Бессарабова А.М. [6] рассматривают разработку трехмерных моделей, а также реализацию сценария взаимодействия пользователя с ними,

несмотря на это, работа использует уже готовые решения для определения столкновений объектов. Также некоторые публикации рассматривают методы обнаружения столкновений. Так, например Фиков М.Г. и Варлашин В.В. [7] описывают задачу детектирования и предотвращения столкновений манипуляторов друг с другом, однако способам предотвращения столкновений обычных объектов друг с другом в VR также не уделяется внимания. Боресков А.В. [1] описывает способы определения пересечения объектов, однако недостает описания возможности их использования для VR. Leng A. [10] рассказывает об использовании методов определения коллизий для системы VR, однако не описывает их.

Таким образом, исследования в данном направлении рассматривают в большей степени внедрение VR в проекты, без описания способов определения столкновений, или, наоборот, способы определения коллизий, не уточняя возможность их использования в виртуальной реальности и, соответственно, без их улучшения для сферы VR.

В этой связи целью исследования является синтез методов для обнаружения столкновений в VR и описание возможностей их использования в системе коллизий. Задачами исследования является:

1. Синтез методов детекции коллизий таких как:
 - столкновение ограничивающих сфер;
 - столкновение ориентированных ограничивающих параллелепипедов;
 - столкновение ограничивающей сферы и ориентированного ограничивающего параллелепипеда;
 - пересечение треугольников триангулированных сеток.
2. Обзор способов использования данных методов для системы коллизии в VR.

Изложение основного материала

В данной статье под коллизией понимается пересечение моделей объектов в трехмерном пространстве. Для оптимизации вычислений следует определять коллизии в две фазы: широкая фаза и узкая фаза. Широкая фаза позволяет быстро отсекают пары объектов, которые точно не сталкиваются. Узкая фаза позволяет точно попарно определять столкновения.

Широкая фаза может быть реализована огромным количеством способов. Далее будут рассмотрены некоторые из них, основанные на использовании ограничивающих сфер и/или ориентированных ограничивающих объемов (Oriented Bounding Boxes — OBB).

Самый простой, однако при этом наименее точный способ для несферических объектов – проверка пересечения ограничивающих сфер. Для проверки пересечения двух сфер необходимо найти расстояние между их центрами (d), используя формулу (1) и сравнить его с суммой их радиусов.

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (1)$$

где (x_1, y_1, z_1) и (x_2, y_2, z_2) – координаты центра первой и второй сферы соответственно.

Если $d < R_1 + R_2$, где R_1 и R_2 – радиусы первой и второй сферы соответственно, то сферы пересекаются, и эта пара объектов нуждается в проверке в узкой фазе.

Случай, когда $d = R_1 + R_2$ обычно рассматривается как крайний случай отсутствия пересечения.

Если $d > R_1 + R_2$, то пересечений нет, а значит дальнейшая проверка этой пары объектов не нужна.

Для более точной проверки пересечения несферических объектов можно использовать OBB. Ориентированные ограничивающие параллелепипеды гораздо точнее определяют границы для большинства объектов в компьютерной графике, однако для проверки пересечения двух OBB требуется значительно больше вычислительных мощностей, по сравнению с ограничивающими сферами [8].

ОВВ имеют центр C , собственные оси, представляющие собой нормализованные векторы $\vec{X}$, $\vec{Y}$, $\vec{Z}$, и полуразмеры a , b , c , которые определяют половину длины ОВВ по осям $\vec{X}$, $\vec{Y}$, $\vec{Z}$ соответственно.

Проверка на пересечение производится с использованием теоремы о разделяющей прямой (SAT), для которой требуются вспомогательные оси. Для того, чтобы гарантировать, что ограничивающие параллелепипеды не пересекаются – необходимо проверить пятнадцать осей: три собственных оси каждого параллелепипеда и девять осей, которые представляют собой всевозможные комбинации векторных произведений между осями двух ОВВ ($\vec{X}_1 \times \vec{X}_2$, $\vec{X}_1 \times \vec{Y}_2$ и т.д.).

Для каждой вспомогательной ненулевой оси нужно вычислить проекцию радиуса двух ОВВ (R_1 и R_2). Вычисляются данные проекции по формуле (2).

$$R = a \cdot |\vec{X} \cdot \vec{L}| + b \cdot |\vec{Y} \cdot \vec{L}| + c \cdot |\vec{Z} \cdot \vec{L}| \quad (2)$$

где $\vec{L}$ – вспомогательная ненулевая ось.

Далее необходимо вычислить расстояние между проекциями центров ограничивающих параллелепипедов на заданную ось (D). Вычислить D можно по формуле (3).

$$D = |(C_2 - C_1) \cdot \vec{L}| \quad (3)$$

Если $D > R_1 + R_2$ хотя бы для одной вспомогательной оси, то ОВВ не пересекаются.

Если $D \leq R_1 + R_2$ для всех вспомогательных осей, то ограничивающие параллелепипеды пересекаются.

Иногда ограничивающая сфера точнее повторяет форму объекта, чем ограничивающий параллелепипед, в связи с чем может возникнуть потребность в проверки пересечения сферы и ОВВ. Введем обозначения для элементов ограничивающего параллелепипеда и ограничивающей сферы.

ОВВ имеют центр C , собственные оси, представляющие собой нормализованные векторы $\vec{X}$, $\vec{Y}$, $\vec{Z}$, и полуразмеры a , b , c , которые определяют половину длины ОВВ по осям $\vec{X}$, $\vec{Y}$, $\vec{Z}$ соответственно.

Ограничивающая сфера имеет радиус R и центр O .

Для проверки пересечения сферы и ОВВ нужно сначала получить вектор от центра ОВВ до центра сферы, сделать это можно путем вычитания из координат центра сферы координаты центра ограничивающего параллелепипеда (4)

$$\vec{CO} = (x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1). \quad (4)$$

где (x_1, y_1, z_1) – координаты точки C , а (x_2, y_2, z_2) – координаты точки O .

Затем вычисляется длина проекции $\vec{CO}$ на каждую ось ограничивающего параллелепипеда. Проекция на ось $\vec{X}$ вычисляется по формуле (5). Проекции на оси $\vec{Y}$ и $\vec{Z}$ вычисляются аналогично.

$$X_{proj} = |\vec{CO} \cdot \vec{X}| \quad (5)$$

Модуль в данной формуле нужен для удобства дальнейших вычислений и не влияет на результат в силу симметричности ОВВ относительно своих осей. Таким образом мы фактически имеем точку центра сферы $(X_{proj}, Y_{proj}, Z_{proj})$ в локальной системе координат ОВВ.

Теперь найдем такую точку ограничивающего параллелепипеда, которая является ближайшей к центру сферы (M). Вычислить координаты этой точки можно по формуле (6).

$$M(x, y, z) = (\min(X_{proj}, a), \min(Y_{proj}, b), \min(Z_{proj}, c)) \quad (6)$$

Имея координаты ближайшей точки к центру сферы и координаты центра сферы вычислим расстояние между ними (D) по формуле (7).

$$D = \sqrt{(X_{proj} - x)^2 + (Y_{proj} - y)^2 + (Z_{proj} - z)^2} \quad (7)$$

где (x, y, z) – координаты точки M

Если $D \geq R$, то объекты не пересекаются. Иначе пересечение есть.

Для более точной проверки пересечения в узкой фазе есть несколько алгоритмов, например: Gilbert-Johnson-Keerthi (GJK), Separating Axis Theorem (SAT) и другие. В данной статье будет рассмотрен самый простой, однако достаточно ресурсозатратный метод определения коллизии – проверка пересечения каждого треугольника полигональной модели (меша) первого объекта с каждым треугольником меша второго объекта.

Данный метод подходит в том случае, если модели объектов содержат не очень большое количество треугольников и обеспечивает абсолютную точность.

Введем обозначения для вершин треугольников. Пусть вершины первого треугольника будут обозначены как A, B, C , а вершины второго треугольника D, E, F .

Вычислим нормали к плоскостям первого и второго треугольников ($\vec{N}_1$ и $\vec{N}_2$ соответственно) путем векторного произведения векторов [1], для этого воспользуемся формулами (8) и (9).

$$\vec{N}_1 = (B - A) \times (C - A) \quad (8)$$

$$\vec{N}_2 = (E - D) \times (F - D) \quad (9)$$

Теперь следует проверить нормали на параллельность. Если модуль скалярного произведения нормалей равен модулю произведения длин этих нормалей, то они параллельны. В этом случае можно прекратить их проверку, так как в VR объекты практически невозможно повернуть абсолютно параллельно. Однако, даже если они будут полностью параллельны, другие треугольники объекта позволяют определить коллизию.

Если треугольники неколлинеарные, продолжим проверку на пересечение. Сначала получим коэффициенты уравнения первой плоскости: $A_{plane1} = N_{1x}$, $B_{plane1} = N_{1y}$, $C_{plane1} = N_{1z}$, $D_{plane1} = -(\vec{N}_1 \cdot A)$, где (N_{1x}, N_{1y}, N_{1z}) – координаты вектора нормали $\vec{N}_1$. Аналогично получим коэффициенты уравнения второй плоскости.

После этого отсеиваем самые простые случаи – когда все точки одного треугольника лежат по одну сторону от плоскости другого треугольника [9]. Определить, с какой стороны лежит точка относительно плоскости можно подставив координаты этой точки в уравнение плоскости другого треугольника. Так для точки D сторону можно вычислить по формуле (10).

$$D_{side} = A_{plane1} \cdot D_x + B_{plane1} \cdot D_y + C_{plane1} \cdot D_z + D_{plane1} \quad (10)$$

где (D_x, D_y, D_z) – координаты точки D . Знак D_{side} показывает, с какой стороны от плоскости лежит эта точка.

Подобным образом находятся E_{side} и F_{side} . Если они имеют одинаковые знаки – дальше проверять эти треугольники не нужно, они не пересекаются.

Аналогично нужно проверить точки первого треугольника относительно плоскости второго треугольника. Данный способ позволяет отбросить большое количество точно непересекающихся треугольников, однако не гарантирует, что оставшиеся треугольники пересекаются.

Внесем некоторые изменения в обозначения для дальнейшего удобства вычислений. Обозначим точку первого треугольника, отсеченную плоскостью второго треугольника, как V_1^1 , а две другие точки обозначим V_0^1 и V_2^1 . Подобным образом обозначим и точки второго треугольника: отдельную точку – V_1^2 , и две остальные – V_0^2 и V_2^2 . Подобным образом изменим обозначения для A_{side} , B_{side} , C_{side} , D_{side} , E_{side} , F_{side} на $d_{v_0^1}, d_{v_1^1}, d_{v_2^1}, d_{v_0^2}, d_{v_1^2}, d_{v_2^2}$ в соответствии с переобозначенными точками.

Затем следует найти прямую пересечения плоскостей треугольников, однако этот шаг можно упростить и найти только направление этой прямой ($\vec{N}_3$). Упрощение допускается с той мыслью, что точные координаты этой прямой не имеют значения для ответа на вопрос о пересечении треугольников. Вычислим это направление по формуле (11).

$$\vec{N}_3 = \vec{N}_1 \times \vec{N}_2 \quad (11)$$

С учетом того, что нам необходимо ответить «да» или «нет» на вопрос о пересечении треугольников, мы можем допустить еще одно упрощение. Спроецируем прямую

пересечения плоскостей на ту ось, к которой она максимально приближена. Теперь мы можем легко найти проекцию (р) точек первого треугольника на прямую, пересекающую обе плоскости по формуле (12).

$$p_{v_i^1} = \begin{cases} V_{ix}^1 \text{ если } |N_{3x}| = \max(|N_{3x}|, |N_{3y}|, |N_{3z}|) \\ V_{iy}^1 \text{ если } |N_{3y}| = \max(|N_{3x}|, |N_{3y}|, |N_{3z}|) \\ V_{iz}^1 \text{ если } |N_{3z}| = \max(|N_{3x}|, |N_{3y}|, |N_{3z}|) \end{cases}, i = 0, 1, 2. \quad (12)$$

где $V_{0x}^1, V_{0y}^1, V_{0z}^1 - x, y, z$, компонента точки V_0^1 соответственно. $N_{3x}, N_{3y}, N_{3z} - x, y, z$, компонента вектора $\vec{N}_3$ соответственно.

Аналогично находятся точки проекции второго треугольника на прямую, пересекающую обе плоскости.

Теперь нужно найти точки пересечения ребер первого треугольника с прямой, пересекающей обе плоскости (t_1^1 и t_2^1). Это можно сделать по формулам (13) и (14) соответственно.

$$t_1^1 = p_{v_0^1} + (p_{v_1^1} - p_{v_0^1}) \frac{d_{v_0^1}}{d_{v_0^1} - d_{v_1^1}} \quad (13)$$

$$t_2^1 = p_{v_1^1} + (p_{v_2^1} - p_{v_1^1}) \frac{d_{v_1^1}}{d_{v_1^1} - d_{v_2^1}} \quad (14)$$

Те же вычисления производим для второго треугольника и получаем t_1^2 и t_2^2 . После этого нужно рассмотреть два интервала и проверить их на перекрытие.

Если $(t_1^1 < t_1^2) \wedge (t_1^1 < t_2^2) \wedge (t_2^1 < t_1^2) \wedge (t_2^1 < t_2^2) \Rightarrow$ пересечения нет.

Если $(t_1^1 > t_1^2) \wedge (t_1^1 > t_2^2) \wedge (t_2^1 > t_1^2) \wedge (t_2^1 > t_2^2) \Rightarrow$ пересечения нет.

Иначе треугольники пересекаются.

Если найдена хотя бы одна пара пересекающихся треугольников, это означает, что между объектами произошло столкновение.

Для реализации системы коллизии можно выбрать любой описанный метод из широкой фазы, в зависимости от требуемой точности. После чего используется алгоритм из узкой фазы, что позволяет создать рабочий пример данной системы.

Также можно использовать комбинацию из нескольких описанных методов, для реализации одного, более точного адаптивного метода. Для этого в программе нужно определять объем ограничивающей сферы и объем ориентированного ограничивающего параллелепипеда, после чего использовать фигуру, объем которой меньше, как основную. После чего следует проверять пересечение наиболее подходящих ограничивающих объемов тел с использованием описанных методов. Данные алгоритмы были реализованы и проверены в программном продукте СПЖЦ «САРУС», продемонстрировав свою работоспособность.

Выводы

В ходе исследования были разработаны и реализованы методы детекции коллизий, предназначенные для определения физических взаимодействий в VR-сценах. Были описаны методы, использующие ограничивающие сферы, OBB и триангулированные меш-сетки объектов, а также возможные способы их совместного использования для создания более перспективного адаптивного метода.

Предложенный адаптивный подход способен перераспределять ресурсы в реальном времени, что критично для автономных VR-систем с ограниченной мощностью. Также описанные методы позволяют полностью реализовать систему обнаружения столкновений для VR и гарантирует точность.

Результаты работы могут быть внедрены в процессы разработки различных симуляторов, игр с использованием виртуальной реальности, программ для моделирования. Перспективным направлением дальнейших исследований является анализ возможностей

дополнительного ускорения метода проверки пересечения треугольников, а также поиск и реализация альтернативных методов точной проверки пересечения объектов.

Литература

1. Боресков А.В. Программирование компьютерной графики. Современный OpenGL. – Москва: ДМК Пресс, 2019. – 374с.
2. Гулов Т.У., Иванченко С.А., Сысоев Н.Д. Технологии виртуальной и дополненной реальности в играх, образовании, медицине, туризме //Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2024. – №. 12-3 (99). – С. 63-69.
3. Дорохов Д.С., Овчинников И.И. Взаимодействие технологий информационного моделирования с возможностями виртуальной и дополненной реальности //Вестник евразийской науки. – 2022. – Т. 14. – №. 3. – С. 45.
4. Зеленский М.М., Рева С.А., Шадеркина А.И. Виртуальная реальность (VR) в клинической медицине: международный и российский опыт //Журнал телемедицины и электронного здравоохранения. – 2021. – Т. 7. – №. 3. – С. 7-20.
5. Кубанов А.А., Махакова Ю.Б., Астахова И.В. Виртуальная реальность как способ модернизации российского медицинского образования //Национальное здравоохранение. – 2021. – Т. 2. – №. 3. – С. 47-54.
6. Москаленко Д.А., Василенко В.А., Бессарабов А.М. Разработка 3d-моделей плотного тела для виртуальной лаборатории //Успехи в химии и химической технологии. – 2024. – Т. 38. – №. 9 (288). – С. 95-97.
7. Фиков М.Г., Варлашин В.В. Исследование характеристик системы предотвращения столкновений манипуляторов //Робототехника и техническая кибернетика. – 2022. – Т. 10. – №. 4. – С. 287-292.
8. Bekhan. Использование ограничивающих объемов в обнаружении столкновений. [Электронный ресурс]. URL: <https://bekhan.org/Information+Technology/Computer+Science/Algorithms/Simulation+systems/Collision+Detection/Broad+Phase/Bounding+volumes/OBB> (дата обращения: 11.02.2026).
9. Garau, Luca; Cherchi, Gianmarco; Scateni, Riccardo. Triangle-triangle intersections with different numerical representations. //: IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW). – 2025. – С. 401–404.
10. Leng A. et al. Development of a virtual reality-based zygomatic implant surgery training system with global collision detection and optimized finite element method model //Computer Methods and Programs in Biomedicine. – 2024. – Т. 243. – С. 107940.

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ БУДУЩЕГО

Сборник трудов
по материалам Всероссийской научной конференции
с международным участием «Зодчий будущего»,
ННГАСУ, 10 апреля 2026 г.