

ОГЛАВЛЕНИЕ

Часть 1. Тематический выпуск “НОМО LUDENS” III

В. В. Кугуракова

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА-СОСТАВИТЕЛЯ 1481–1482

Т. Р. Арсланов

КЛОНИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ МЕЖДУ ВАРИАНТАМИ ИГР:
ДОМЕННАЯ АДАПТАЦИЯ И ПЕРСОНАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ
В ШАХМАТАХ ФИШЕРА 1483–1494

Р. Т. Исхаков, В. В. Кугуракова

ГИБРИДНЫЙ ПОДХОД К АВТОНОМНОМУ УПРАВЛЕНИЮ
РОБОТИЗИРОВАННЫМ УСТРОЙСТВОМ, СОЧЕТАЮЩИЙ
ОБУЧЕНИЕ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ И ОБУЧЕНИЕ
НА ОСНОВЕ ДЕМОНСТРАЦИЙ ОПЕРАТОРА 1495–1520

В. В. Кугуракова, М. В. Кочакова, В. В. Липатов

ИНСТРУМЕНТЫ ПОДДЕРЖКИ ОРИЕНТИРОВАННОГО
НА ИГРОКА НАРРАТИВА В ИГРАХ С ОТКРЫТЫМ МИРОМ 1521–1556

В. В. Кугуракова, В. Т. Трофимчук

ВИЗУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИГРОВЫХ МЕХАНИК
В ИНСТРУМЕНТЕ TULA: ТЕМПОРАЛЬНЫЕ
И ВЕРОЯТНОСТНЫЕ АСПЕКТЫ 1557–1584

А. А. Кутузов, М. В. Шматко

ПРОЕКТИРОВАНИЕ БЕЗНАСИЛЬСТВЕННОЙ БОЕВОЙ СИСТЕМЫ
ДЛЯ ДЕТСКОЙ RPG-ИГРЫ 1585–1609

Н. Р. Нурлыгаянов

ПРИМЕНЕНИЕ РУЧНОГО РЕДАКТОРА И ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКОГО
ПАРСЕРА ИСХОДНЫХ ТЕКСТОВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ КОРПУСА
ИГРОВЫХ СЦЕНАРИЕВ 1610–1639

А. М. Примаченко

**ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВНОСТИ ГИБРИДНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ВИЗУАЛЬНОГО ВОСПРИЯТИЯ ИГРОВЫХ АГЕНТОВ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТРИСОВКИ ТЕКСТУР**

1640–1674

М. Д. Рахматуллина, Ю. А. Карпеева

**ТЕХНОЛОГИИ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ
В МЕДИЦИНСКОМ ОБРАЗОВАНИИ**

1675–1704

М. В. Шматко, А. Д. Мякишев

**РАЗРАБОТКА МОДУЛЬНОЙ АРХИТЕКТУРЫ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ
ИНТЕРФЕЙСОВ ДЛЯ ИГР НА ДВИЖКЕ UNREAL ENGINE
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛАГИНА-ФРЕЙМВОРКА COMMON UI**

1705–1739

М. В. Шматко, Л. Р. Пономарев

**ИНСТРУМЕНТАРИЙ ДЛЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАЗРАБОТКИ
НАРРАТИВНОГО КОНТЕНТА И ГЕЙМДИЗАЙНА В ИНДИ-RPG:
РЕАЛИЗАЦИЯ НА ДВИЖКЕ GODOT**

1740–1771

Часть 2. Тематический выпуск

«ИНФОРМАТИЗАЦИЯ ИНЖЕНЕРНОГО ОБРАЗОВАНИЯ»

Е. Р. Зяблова

**РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОСВЕЩЕНИЯ
С УЧЕТОМ КОГНИТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ**

1772–1789

Я. Р. Саввин, Д. В. Вершинин

**РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ПРОГРАММ
ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ В ОБЛАСТИ
АВТОМАТИЗАЦИИ НА БАЗЕ СРЕДЫ SimInTech**

1790–1814

О. Ю. Шамаева, А. М. Чернецов, Л. А. Зинченко

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ
ДЛЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ АРХИТЕКТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
СТАНДАРТОВ SYCL И OpenMP**

1815–1842

В. В. Шаронов, Т. Н. Абсатаров, М. В. Лукашевский, С. Д. Федорович ОРГАНИЗАЦИЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА В ИНЖЕНЕРНОМ ОБРАЗОВАНИИ НА БАЗЕ ВЕБ-ПЛАТФОРМЫ	1843–1857
Часть 3. Оригинальные статьи	
М. В. Бобырь, А. А. Асеев ОНТОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПОЗНАВАНИЯ ЖЕСТОВ РУК ОПЕРАТОРА	1858–1879
М. В. Бобырь, Н. А. Милостная, С. Ю. Бельская НЕЧЕТКО-ЛОГИЧЕСКАЯ АДАПТАЦИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ИЗБИРАТЕЛЬНОСТИ ДЕКОДИРОВАНИЯ ПРИ АВТОРЕГРЕССИОННОЙ ГЕНЕРАЦИИ ТЕКСТА ЯЗЫКОВЫМИ МОДЕЛЯМИ	1880–1905
Е. О. Брежнева КОГНИТИВНАЯ АДАПТАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СКОЛЬЗЯЩЕГО ОКНА БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО МЕТОДА ОТНОШЕНИЯ ПЛОЩАДЕЙ	1906–1923
М. Джериби, Х. Хао, А. М. Сухов ТЕХНОЛОГИИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ АНАЛИЗА ОГРАНИЧЕНИЙ КОНТЕНТА В ИНТЕРНЕТЕ	1924–1958
Д. С. Коптев, Ю. А. Халин МЕТОД ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ КОГНИТИВНОЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ АВИАЦИОННОГО ПЕРСОНАЛА ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ	1959–1988
Д. А. Ли, И. Г. Ольгина ПРИМЕНЕНИЕ ГРАФОВЫХ МОДЕЛЕЙ УЧЕБНЫХ ПЛАНОВ ДЛЯ АНАЛИЗА ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ ПО СПЕЦИАЛЬНОСТЯМ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ	1989–2008

Э. В. Саитов, О. А. Невзорова

**МЕТОД ИЗВЛЕЧЕНИЯ ГЛАВНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И ФОРМУЛ
ИЗ ТЕКСТОВ НАУЧНЫХ СТАТЕЙ НА ОСНОВЕ
БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ**

2009–2037

А. Н. Сингин, А. О. Щирый

**ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕРАТИВНО-СОСТЯЗАТЕЛЬНЫХ НЕЙРОННЫХ
СЕТЕЙ ДЛЯ СИНТЕЗА ИОНОГРАММ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ
ИОНОСФЕРЫ: ПРОБЛЕМЫ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ**

2038–2053

ТЕМАТИЧЕСКИЙ ВЫПУСК "НОМО LUDENS", III.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Уважаемые коллеги, исследователи, преподаватели, разработчики и студенты!

Представляю вашему вниманию тематический выпуск Часть 3; Часть 1 опубликована в № 1 за 2025 г., часть 2 – в № 3 за 2025 г., подготовленный по итогам III Всероссийской конференции разработчиков видеоигр “Номо Ludens” (Человек Играющий), состоявшейся 26 декабря 2025 г. в стенах Казанского федерального университета.

С каждым годом конференция “Номо Ludens” все увереннее утверждает себя как значимая научно-практическая площадка, объединяющая специалистов, заинтересованных в исследовании, проектировании и разработке видеоигр. Особенно отраднo, что проведенная конференция привлекла внимание не только исследователей и разработчиков из Казани, но и представителей других высших учебных заведений, что свидетельствует о расширении профессионального сообщества и росте интереса к научному осмыслению игровой индустрии в России.

Материалы, вошедшие в настоящий выпуск, отражают широкий спектр актуальных направлений современной игровой разработки и game studies. Среди представленных работ – исследования в области искусственного интеллекта, виртуальной и смешанной реальностей, геймдизайна, нарративных практик, образовательных и прикладных аспектов использования игровых технологий, а также инструментальных решений, направленных на совершенствование процессов разработки. Такой тематический диапазон наглядно демонстрирует междисциплинарный характер игровой индустрии, находящейся на пересечении технологий, гуманитарного знания, дизайна, психологии, педагогики и искусства.

Особую ценность представляет то, что конференция стала пространством живого диалога между молодыми исследователями, практикующими разработчиками и академическим сообществом. Именно такое взаимодействие позволяет не только зафиксировать текущее состояние индустрии, но и сформировать

основу для дальнейшего развития российской школы исследований видеоигр и разработки интерактивных цифровых продуктов.

Выражаю искреннюю благодарность авторам представленных работ за их содержательный вклад, организационному комитету конференции, рецензентам и всем участникам, благодаря которым подготовка материалов и проведение конференции стали возможны. Подобные инициативы особенно важны сегодня, когда сфера разработки видеоигр нуждается не только в технологическом росте, но и в прочной научной, методологической и образовательной базе.

Уверена, что тематический выпуск будет полезен как исследователям и преподавателям, так и разработчикам-практикам, студентам и всем, кто связывает свою профессиональную деятельность с видеоиграми и интерактивными медиа. Надеюсь, что конференция “Homo Ludens” продолжит развиваться, расширять круг участников и укреплять статус одной из заметных отечественных площадок для профессионального и научного общения в области видеоигр.

Председатель конференции “Homo Ludens”, редактор-составитель тематического выпуска

В. В. Кугуракова

КЛОНИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ МЕЖДУ ВАРИАНТАМИ ИГР: ДОМЕННАЯ АДАПТАЦИЯ И ПЕРСОНАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ В ШАХМАТАХ ФИШЕРА

Т. Р. Арсланов^[0009-0002-1110-8503]

Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

timars-mail@yandex.ru

Аннотация

Клонирование поведения позволяет создавать модели, способные принимать решения так же, как это делает человек. Хотя различные модели успешно предсказывают действия человека в играх, их способность имитировать отдельных игроков снижается при изменении вариантов игры.

В работе исследованы стратегия доменной адаптации и персонализации на примере шахмат Фишера со случайной расстановкой фигур. На базе шахматной модели Maia, протестировано несколько стратегий дообучения. Установлены три ключевых закономерности: старые записи игрока не оказывают влияния; каждая новая запись крайне эффективна; доменная адаптация и персонализация дополняют друг друга – их сочетание дает лучший результат.

Ключевые слова: *игры, искусственный интеллект, моделирование игрока, клонирование поведения, шахматы.*

ВВЕДЕНИЕ

Клонирование поведения (behavioral cloning) – это метод обучения на демонстрациях человеческого поведения, который позволяет ИИ-системам имитировать человеческое принятие решений. Он помогает достичь понимания, как именно играют люди, включая характерные неоптимальные решения. В контексте разработки игр это важно для тестирования баланса, адаптации противников и персонализации игрового опыта [1].

В отличие от методов клонирования поведения, классические методы машинного обучения создают системы, способные показывать высокие результаты в играх. Тем не менее действия таких систем слабо напоминают человеческие [2, 3].

Специализированные модели также имеют определенные ограничения. Например, давно известна проблема применимости полученных навыков в смежных областях [4]. На практике это означает сложности в адаптации к новому контенту, т. е. например поведение модели, обученной на старых игровых картах, не будет соответствовать поведению игроков на новых картах. Понимание того, какие данные необходимы для поддержания качества моделей в новых условиях, имеет прямое практическое значение для игровой индустрии.

Ранее мы предложили схему генерации персонажей, персонализированных под конкретных игроков, в которой такие ИИ-агенты используются как инструмент симуляции и тестирования нового контента [5]. Игровой прототип для проверки возможностей такой системы, создаваемый нами, обладает строго описанным набором правил и механик, в рамках фреймворка FAST-GM [6]. Поэтому в настоящей работе для анализа, какие стратегии адаптации и персонализации позволят быстро подстроить модель под новые условия, мы использовали шахматы с четко формализованными механиками.

Одним из лучших примеров ИИ-моделей игроков является Maia, разработанная для шахмат. В своей работе авторы добились того, что их модель точно предсказывает следующий ход конкретного игрока в 55% случаев [7]. Для этого они использовали двухэтапный подход к дообучению. В ходе первого этапа были использованы результаты игроков, похожих по рейтингу и стилю. В ходе второго этапа было проведено дообучение на малом объеме данных конкретного игрока.

Для шахматных моделей новым контентом будут различные варианты шахмат. Одним из самых популярных являются шахматы Фишера, также известные как шахматы 960 (по числу начальных позиций). Их пространство действий и игровая механика остаются неизменными по сравнению с обычными правилами. В то же время здесь неприменима классическая дебютная теория, что вынуждает игроков вырабатывать новые стратегии.

БЛИЗКИЕ ПО ТЕМАТИКЕ РАБОТЫ

Поведенческое клонирование относится к классу методов имитационного обучения. Помимо него применяют и более сложные системы, в том числе со-

ствязательного имитационного обучения (adversarial imitation learning), где обучение сводится к приближению распределения «состояние–действие» эксперта без явной функции награды [8].

В разработке игр такие методы позволяют персонализировать игровой опыт благодаря поведению конкретных игроков. Обзор подходов к моделированию игроков и типичным источникам данных представлен в работе Яннакиса [9]. Ранее он же вместе с Тогелиусом предложил фреймворк процедурной генерации, основанной на опыте (experience-driven PCG), где генерация и/или адаптация контента опираются на вычислительные модели пользовательского опыта [10, 11].

Наконец, множество работ было посвящено обучению моделей по данным игроков. Так, AlphaStar обучался игре в StarCraft II по человеческим реплеям, после чего дообучался, играя сам с собой [12]. Помимо стратегий также описаны подходы к клонированию поведения игрока в шутерах от первого лица, например в Counter-Strike GO и Doom 2 [13, 14].

МЕТОДОЛОГИЯ

Проанализирована эффективность различных стратегий дообучения модели на базе ответов на пять вопросов:

1. Насколько падает точность предсказаний модели, обученной на стандартных шахматах, при применении к шахматам Фишера?
2. Помогают ли данные игрока из стандартных шахмат предсказывать его ходы в шахматах Фишера?
3. Насколько эффективны данные из нового варианта от других игроков?
4. Дает ли добавление данных конкретного игрока из нового варианта дополнительный выигрыш поверх доменной адаптации?
5. Насколько снижается точность исходной модели после ее адаптации к новым правилам?

В качестве основы выбрана предобученная модель Maia. Для ее обучения авторы использовали более 20 млн человеческих партий с платформы Lichess. Модель принимает на вход позицию на доске и выдает распределение вероятностей по допустимым ходам [7]. Подобный подход – использование низкоуров-

невых действий для моделирования игрока – встречается также у других авторов в контексте видеоигр [15].

Исходная модель проходит дообучение на различных данных: записи партий игрока в обычные шахматы и шахматы Фишера, записи множества игроков о партиях в шахматы Фишера. Все партии также были сыграны в Lichess.

Предполагается, что на практике имеется небольшое число записей игр с новым вариантом для конкретного игрока. Поэтому соответствующим образом были скорректированы размеры наборов данных для дообучения: 150 партий для шахмат Фишера и 500 партий в стандартные шахматы.

Так как миттельшпиль и эндшпиль не отличаются в двух вариантах игры, для проверки эффективности стратегий были отобраны только дебюты из 450 партий, что суммарно дало тестовую выборку в 4100 ходов.

Кроме того, нужно было оценить, насколько ухудшилось предсказание для классических шахмат после дообучения (т. е. происходит ли деградация качества в исходном домене). Для этого была использована выборка в 5000 дебютных ходов из 500 партий.

Размеры выборок для всех конфигураций представлены в табл. 1, выборки не пересекаются между собой. Профиль игрока для тестирования был выбран, исходя из наличия большого числа партий, а также из относительно высокого рейтинга (ELO 1800-2000), в предположении, что к данному моменту у него сформировался определенный стиль игры.

В качестве метрики были выбраны два показателя:

- точность Тор-1: предсказанный моделью ход в точности совпадает со сделанным;
- точность Тор-3: сделанный ход входит в тройку наиболее вероятных предсказаний модели.

В учетом вероятностного характера вывода модели можно утверждать, что три лучших прогноза могут дать более полное представление о том, насколько она приближена к реальному игроку.

Табл. 1. Исходные данные.

Конфигурация	Описание	Данные для дообучения
(a)	базовая модель	нет
(b)	персонализация под стандартную игру	500 партий в стандартные шахматы (целевой игрок)
(c)	доменная адаптация	800 тыс. партий в шахматы Фишера (разные игроки)
(d)	персонализация в шахматах Фишера	150 партий в шахматы Фишера (целевой игрок)
(e)	доменная адаптация + персонализация	800 тыс. партий в шахматы Фишера + 150 партий игрока в шахматы Фишера

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты тестирования всех выбранных моделей представлены в табл. 2.

Табл. 2. Результаты тестирования.

Конфигурация	Описание	Тор-1	Тор-3
(a)	базовая модель	30.61%	55.55%
(b)	персонализация под стандартную игру	30.17%	55.44%
(c)	доменная адаптация	40.03%	69.57%
(d)	персонализация в шахматах Фишера	37.35%	65.34%
(e)	доменная адаптация + персонализация	41.08%	70.56%

Конфигурация (b), дообученная на 500 партиях целевого игрока в стандартные шахматы, не показала улучшения по сравнению с базовой моделью. Этот нулевой (или даже немного отрицательный) результат означает, что паттерны игрока, усвоенные на стандартных шахматах, не обобщаются на шахматы Фишера. Несмотря на идентичные правила движения фигур, распределения позиций различаются настолько сильно, что моделирование игрока не переносится между вариантами.

Это может противоречить интуиции. На наш взгляд, наиболее вероятным объяснением является доминирование дебютной теории. В стандартных шахматах дебюты часто представляют собой заученные варианты, из-за чего стиль игры сводится к выбору предпочтительных дебютов. Дальнейшее дообучение на стандартных шахматах приводит к переобучению на любимые дебюты конкретного игрока.

Конфигурация (c), дообученная на 800 тыс. партий в шахматы Фишера от разных игроков, существенно повысила точность прогноза. Записи матчей других игроков обеспечили наибольший прирост, подтвердив, что адаптация даже к слабо отличающемуся варианту необходима.

Конфигурация (d), дообученная всего на 150 партиях целевого игрока в шахматы Фишера, также дала значительный прирост точности. Персонализация достигла сопоставимых результатов, даже с учетом меньшего числа данных по сравнению с доменной адаптацией.

Комбинированный подход конфигурации (e) превзошел обе отдельные стратегии, что указывает на взаимодополняющий характер доменной адаптации и персонализации. Подобный подход, требующий дополнительного обучения после доменной адаптации, согласуется с результатами, полученными другими авторами в смежных областях машинного обучения [16].

Дополнительно мы оценили, как дообучение на данных шахмат Фишера влияет на качество предсказаний в стандартных шахматах. Результаты для тех же конфигураций (a)–(e) на выборке из 5000 дебютных ходов (500 партий) приведены в табл. 3. Из таблицы видно, что адаптация и персонализация к шахматам Фишера (c), (d) приводят к небольшому падению точности в стандартных шахматах относительно базовой модели, что указывает на частичную деградацию качества в исходном домене после дообучения.

Табл. 3. Результаты тестирования на стандартных шахматах после дообучения.

Конфигурация	Описание	Топ-1	Топ-3
(a)	базовая модель	48.08%	76.08%
(b)	персонализация под стандартную игру	53.50%	83.90%
(c)	доменная адаптация	45.62%	75.68%
(d)	персонализация в шахматах Фишера	47.82%	75.42%
(e)	доменная адаптация + персонализация	46.98%	75.90%

Интерес представляет факт, что персонализация адаптированной под шахматы Фишера модели (e) несколько компенсирует изначальную деградацию несмотря на то, что ее применение к базовой модели также ухудшает результат. При этом персонализация на стандартных шахматах (b) ожидаемо улучшает показатели, в соответствии с результатами авторов Maia.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследован перенос модели для клонирования поведения от стандартных шахмат к шахматам Фишера, с помощью сравнения стратегий доменной адаптации и персонализации игрока. Ключевым выводом является необходимость двухэтапного подхода к адаптации модели, так как игровой стиль может не переноситься из-за особенностей того или иного варианта игры. С другой стороны, сочетания общих и персонализированных данных позволили добиться максимального результата даже при относительной ограниченности выборки конкретного игрока.

С практической точки зрения эти результаты означают, что при добавлении нового контента модель игрока требует балансировки двух показателей: качества в новом домене и совместимости с исходным доменом. В пайплайне тестирования контента это можно использовать так: сначала выполнить доменную адаптацию на данных множества игроков для новой версии контента, затем провести быструю персонализацию на небольшом числе партий конкретного иг-

рока. После каждого шага нужно измерить показатели в новом и старом доменах. Это позволит контролировать снижение точности на старом контенте и надежнее применять агентов для симуляции прохождения и проверки новых элементов.

Однако стоит отметить ограничения исследования. Результаты получены для одного игрока; необходима проверка на нескольких игроках различного уровня. Кроме того, протестирована только Maia, в основе которой лежит остаточная нейронная сеть. Другие архитектуры могут демонстрировать иную картину переноса.

В дальнейшем мы планируем провести подобный эксперимент на прототипе реальной видеоигры, где различие между вариантами может быть гораздо более существенным.

ЛУДОГРАФИЯ

Blizzard Entertainment. (2010). Starcraft 2 [Windows, MacOS]. Blizzard Entertainment.

Duplessis, T. (2010). Lichess [Web]. <https://lichess.org>

Valve, Hidden Path Entertainment. (2012). Counter-Strike: Global Offensive [Windows, Linux, MacOS, Xbox 360, Playstation 3]. Valve.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ingram B. et al.* Play-style Identification and Player Modelling for Generating Tailored Advice in Video Games // *AIIDE*. 2025. Vol. 21, No. 1. P. 258–268.
2. *McIlroy-Young R. et al.* Aligning Superhuman AI with Human Behavior: Chess as a Model System // *Proceedings of the 26th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*. Virtual Event CA USA: ACM. 2020. P. 1677–1687.
3. *McIlroy-Young R. et al.* Learning Models of Individual Behavior in Chess // *Proceedings of the 28th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. Washington DC USA: ACM. 2022. P. 1253–1263.
4. *Taylor M.E., Stone P.* Transfer Learning for Reinforcement Learning Domains: A Survey // *Journal of Machine Learning Research*. 2009. No. 10. P. 1633–1685.
5. *Арсланов Т.Р.* Генеративные методы для создания адаптивных игровых персонажей в играх-сервисах // *Электронные библиотеки*. 2025. Т. 28.

№ 3. С. 468–483.

6. Кузурасова В.В. Формальный подход к пространственно-временному моделированию игровых систем // Ученые записки Казанского университета. Серия Физико-математические науки. 2024. Т. 166, № 4. С. 532–554.

7. Tang Z. et al. Maia-2: A Unified Model for Human-AI Alignment in Chess // Advances in Neural Information Processing Systems. 2024. Vol. 37. P. 20919-20944.

8. Ho J., Ermon S. Generative Adversarial Imitation Learning // Advances in Neural Information Processing System. 2016. Vol. 29.

9. Yannakakis G.N., Togelius J. Player Modeling // Artificial Intelligence and Games. 2025. P. 315–335.

10. Yannakakis G.N., Togelius J. Experience-Driven Procedural Content Generation // IEEE Transactions on Affective Computing. 2011. Vol. 2, No. 3. P. 147–161.

11. Togelius J. et al. Search-Based Procedural Content Generation: A Taxonomy and Survey // IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games. 2011. Vol. 3, No. 3. P. 172–186.

12. Vinyals O. et al. Grandmaster level in StarCraft II using multi-agent reinforcement learning // Nature. 2019. Vol. 575, No. 7782. P. 350–354.

13. Pearce T., Zhu J. Counter-Strike Deathmatch with Large-Scale Behavioural Cloning // 2022 IEEE Conference on Games (CoG). 2022. P. 104–111.

14. Spick R. et al. Behavioural Cloning in VizDoom // arXiv. 2024. No. 2401.03993. P. 1–13.

15. Xia R. Y., Gow J., Lucas S. Play Style Identification Using Low-Level Representations of Play Traces in MicroRTS // 2025 IEEE Conference on Games (CoG). 2025. P. 1–4.

16. Gururangan S. et al. Proceedings of the 58th annual meeting of the association for computational linguistics. 2020. P. 8342–8360.

BEHAVIORAL CLONING ACROSS GAME VARIANTS: DOMAIN ADAPTATION AND PLAYER PERSONALIZATION IN CHESS960

T. R. Arslanov^[0009-0002-1110-8503]

Kazan (Volga region) Federal University, Kazan, Russia

timars-mail@yandex.ru

Abstract

Behavioral cloning allows creating models capable of making decisions in the same way humans do. Although various models successfully predict human actions in games, their ability to imitate individual players decreases when game variants change. In this work, we explore domain adaptation and personalization strategies using Fischer Random Chess with random piece placement. Using the Maia chess model presented by Tang et al., we tested several fine-tuning strategies. The results revealed three key patterns: old player records have no impact; each new record is highly effective; domain adaptation and personalization complement each other - their combination yields the best result.

Keywords: *games, artificial intelligence, player modeling, behavioral cloning, chess.*

REFERENCES

1. Ingram B. et al. Play-style Identification and Player Modelling for Generating Tailored Advice in Video Games // AIIDE. 2025. Vol. 21, No. 1. P. 258–268.
2. McIlroy-Young R. et al. Aligning Superhuman AI with Human Behavior: Chess as a Model System // Proceedings of the 26th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining. Virtual Event CA USA: ACM. 2020. P. 1677–1687.
3. McIlroy-Young R. et al. Learning Models of Individual Behavior in Chess // Proceedings of the 28th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. Washington DC USA: ACM. 2022. P. 1253–1263.
4. Taylor M.E., Stone P. Transfer Learning for Reinforcement Learning Domains: A Survey // Journal of Machine Learning Research. 2009. No. 10. P. 1633–1685.
5. Arslanov T.R. Generative Methods for Creating Adaptive Playable Characters

in Service Games // Russian Digital Libraries Journal. 2025. Vol. 28, No. 3. P. 468–483.

6. *Kugurakova V.V.* A formal approach to spatio-temporal modeling of game systems // Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki. 2024. Vol. 166, No. 4. P. 532–554.

7. *Tang Z. et al.* Maia-2: A Unified Model for Human-AI Alignment in Chess // Advances in Neural Information Processing Systems. 2024. Vol. 37. P. 20919-20944.

8. *Ho J., Ermon S.* Generative Adversarial Imitation Learning // Advances in Neural Information Processing System. 2016. Vol. 29.

9. *Yannakakis G.N., Togelius J.* Player Modeling // Artificial Intelligence and Games. 2025. P. 315–335.

10. *Yannakakis G.N., Togelius J.* Experience-Driven Procedural Content Generation // IEEE Transactions on Affective Computing. 2011. Vol. 2, No. 3. P. 147–161.

11. *Togelius J. et al.* Search-Based Procedural Content Generation: A Taxonomy and Survey // IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games. 2011. Vol. 3, No. 3. P. 172–186.

12. *Vinyals O. et al.* Grandmaster level in StarCraft II using multi-agent reinforcement learning // Nature. 2019. Vol. 575, No. 7782. P. 350–354.

13. *Pearce T., Zhu J.* Counter-Strike Deathmatch with Large-Scale Behavioural Cloning // 2022 IEEE Conference on Games (CoG). 2022. P. 104–111.

14. *Spick R. et al.* Behavioural Cloning in VizDoom // arXiv. 2024. No. 2401.03993. P. 1–13.

15. *Xia R. Y., Gow J., Lucas S.* Play Style Identification Using Low-Level Representations of Play Traces in MicroRTS // 2025 IEEE Conference on Games (CoG). 2025. P. 1–4.

16. *Gururangan S. et al.* Proceedings of the 58th annual meeting of the association for computational linguistics. 2020. P. 8342–8360.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ



АРСЛАНОВ Тимур Рузелевич – аспирант Институт информационных технологий и интеллектуальных систем Казанского федерального университета. Направление исследований: фундаментальные аспекты создания видеоигр с высокой реиграбельностью.

Timur Ruzelevich ARSLANOV – postgraduate student at the Institute of Information Technologies and Intelligent Systems of Kazan Federal University. Research interests: fundamental aspects of creating video games with high replayability.

email: timars-mail@yandex.ru

ORCID: 0009-0002-1110-8503

Материал поступил в редакцию 23 апреля 2026 года

ГИБРИДНЫЙ ПОДХОД К АВТОНОМНОМУ УПРАВЛЕНИЮ РОБОТИЗИРОВАННЫМ УСТРОЙСТВОМ, СОЧЕТАЮЩИЙ ОБУЧЕНИЕ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ И ОБУЧЕНИЕ НА ОСНОВЕ ДЕМОНСТРАЦИЙ ОПЕРАТОРА

Р. Т. Исхаков¹ [0009-0004-9262-7296], В. В. Кугуракова² [0000-0002-1552-4910]

^{1, 2}Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

¹iskhakovrobert42@gmail.com, ²vlada.kugurakova@gmail.com

Аннотация

Предложен и экспериментально верифицирован воспроизводимый гибридный подход к обучению автономного управления роботизированным устройством, реализованный на общедоступном инструментарии без специализированного вычислительного оборудования. Подход сочетает обучение на основе демонстраций оператора, обучение с подкреплением, учебный план и доменную рандомизацию в единой последовательной схеме. На основе сравнительного анализа пяти прототипов, представляющих ключевые классы архитектурных решений, выявлены применимые подходы для ресурсно-ограниченных условий. Три контролируемых эксперимента в Unity ML-Agents показали превосходство гибридной комбинации в сравнении с изолированными подходами по скорости обучения и устойчивости к изменениям среды. Обозначены ограничения, связанные с катастрофическим забыванием, и выявлены перспективы интеграции больших языковых моделей для генерации синтетических обучающих данных.

Ключевые слова: телеуправление, удаленное управление, робот, виртуальная реальность, виртуальная среда, машинное обучение, машинное обучение с подкреплением, машинное обучение на основе демонстраций, демонстрация оператором, Unity, ML-agents.

ВВЕДЕНИЕ

Индустрия роботизированных устройств переживает устойчивый переход от телеуправляемых систем к автономным. Работы авторов по VR-телеуправлению [1–7], генерации вариаций движений [8] и распознаванию объектов в прикладных задачах [9] создали основу, позволяющую замкнуть следующую цепочку: оператор записывает демонстрации через VR¹-интерфейс, после этого роботизированное устройство дообучается самостоятельно. Ключевым препятствием остается обучение: ни один классический подход машинного обучения не обеспечивает одновременно быстрый старт, устойчивость к изменениям среды и способность обобщать навыки. Обучение предложено проводить с цифровой моделью прототипа роботизированного устройства (см. рис. 1). Важно учесть, что применение обученной модели ограничено использованием того роботизированного устройства, цифровая модель которого использовалась в процессе обучения. Применение обученной модели для других роботизированных устройств требует провести процесс обучения заново, но уже с другой соответствующей цифровой моделью этих устройств.

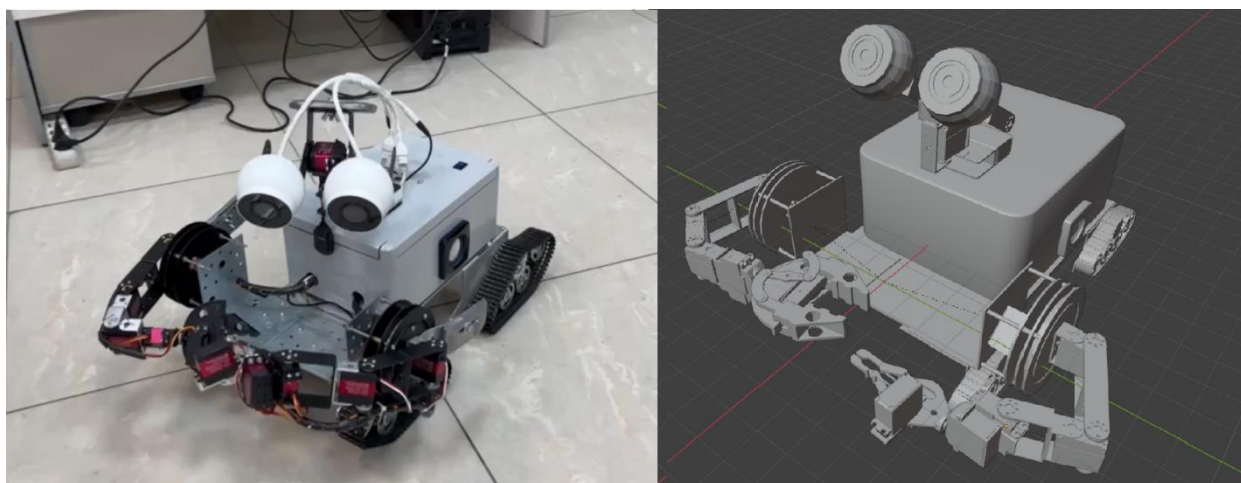


Рис. 1. Слева – физический прототип, справа – цифровая модель роботизированного устройства.

Практика ведущих разработчиков свидетельствует о повсеместном переходе к гибридным подходам. Однако все успешные решения либо опираются на

¹ VR (Virtual Reality) – виртуальная реальность; технология, создающая эффект присутствия в смоделированном трехмерном окружении.

корпоративную инфраструктуру, либо являются закрытыми проприетарными системами без воспроизводимого протокола, поэтому исследовательские группы, работающие с ограниченными ресурсами, лишены практического ориентира.

Цель настоящей работы – разработать воспроизводимый гибридный подход к обучению автономного управления роботизированным устройством в условиях ограниченных ресурсов и экспериментально подтвердить, что сочетание обучения на основе демонстраций оператора с обучением с подкреплением и доменной рандомизацией превосходит каждый из подходов по отдельности.

В результате проведенных исследований предложен и верифицирован воспроизводимый гибридный подход на общедоступном инструментарии (Unity ML-Agents, VR-гарнитура): обучение на основе демонстраций – инициализирующий этап; RL^2 – этап обобщения; доменная рандомизация совместно с учебным планом – механизм формирования устойчивости. Поставлены и решены следующие задачи:

- 1) провести сравнительный анализ прототипов, представляющих ключевые классы гибридных архитектур, с целью выявления применимых решений для ресурсно-ограниченных условий;
- 2) обосновать выбор виртуальной среды для обучения и инструментов захвата движений оператора;
- 3) разработать и реализовать гибридный подход в Unity ML-Agents;
- 4) экспериментально сравнить эффективность изолированных и гибридного подходов;
- 5) определить ограничения и обозначить направления развития, включая интеграцию больших языковых моделей (Large Language Model, LLM) для генерации синтетических данных.

1. АНАЛИЗ ПОДХОДОВ ОБУЧЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ УСТРОЙСТВ

Подходы к обучению роботизированных устройств принято делить на три фундаментальных класса: обучение с учителем, обучение с подкреплением и обучение без учителя.

При обучении с учителем роботизированное устройство воспроизводит

² RL (Reinforcement Learning) – обучение с подкреплением; агент обучается методом проб и ошибок, максимизируя числовую награду.

действия оператора по записанным демонстрациям. Такой подход обеспечивает быстрый старт и особенно эффективен для задач, которые сложно описать с помощью математической функции награды. Принципиальное ограничение состоит в том, что модель не способна превзойти учителя: накапливающиеся отклонения от траектории демонстрации приводят к ошибкам в ситуациях, не представленных в обучающем наборе [10].

Обучение с подкреплением (RL) позволяет агенту самостоятельно формировать оптимальную стратегию методом проб и ошибок, максимизировав числовую награду. Достоинством является принципиальная возможность превзойти оператора, недостатком – высокая вычислительная стоимость: в условиях разреженной награды агент совершает огромное число случайных действий до первого успеха [11, 12].

Обучение без учителя применяют преимущественно для анализа сенсорных данных; в чистом виде для управления роботизированными устройствами его используют редко, как правило, в составе гибридных схем для предварительного формирования признакового пространства [13].

Ни один из фундаментальных подходов в изолированном применении не решает достаточно эффективно задачу автономного управления в изменяющейся среде. Это обусловило развитие следующих прикладных стратегий:

- обучение с учебным планом (curriculum learning) – задача разбивается на уроки возрастающей сложности, ускоряя обучение в условиях разреженной награды [14, 15];
- преобразование симуляции в реальность (sim-to-real transfer) – обучение в виртуальной среде позволяет запускать сотни параллельных экземпляров и ускоряет процесс в тысячи раз по сравнению с реальным миром [16];
- доменная рандомизация (domain randomization) – создается множество вариаций виртуальной среды с различными параметрами (освещение, цвет, положение объектов), что повышает устойчивость обученной модели к реальным условиям [17];
- состязательное обучение (adversarial training) – в процессе обучения задействуется вторая нейронная сеть, намеренно усложняющая задачу основному агенту; метод выявляет и устраняет слабые места модели [18];
- обучение на основе крупных предобученных моделей (large-scale

pretraining + fine-tuning) – вместо обучения с нуля используют готовые мульти-модальные модели с обобщенным пониманием мира; дообучение на небольшом наборе роботизированных демонстраций резко снижает требования к объему специализированных данных [19].

Поскольку фундаментальные подходы редко применяются в чистом виде, именно их комбинации с прикладными стратегиями образуют гибридные схемы, демонстрирующие наилучшие результаты на практике.

2. ГИБРИДНЫЕ ПОДХОДЫ В ПРОМЫШЛЕННЫХ И АКАДЕМИЧЕСКИХ ПРОТОТИПАХ

Для формирования аналитической базы нами рассмотрены пять прототипов, каждый из которых представляет отдельный класс архитектурных решений:

- Tesla Optimus воплощает подход на основе маховика данных (data-flywheel): корпоративный флот устройств обеспечивает непрерывный поток обучающих данных;
- HumanPlus представляет маломасштабную академическую разработку (low-cost academic) с акцентом на эффективность алгоритмов при минимальном бюджете;
- XPeng Iron демонстрирует перенос технологий автономного вождения на роботизированную платформу (automotive transfer);
- Figure AI реализует стратегию тонкой настройки предобученной базовой модели (foundation model fine-tuning);
- GREEN от Сбера является примером системы на основе LLM, адаптированной к локализованному рынку (LLM-based, localized).

Совокупность этих классов охватывает основное пространство современных гибридных архитектур: практические решения, как правило, представляют собой вариации или комбинации этих паттернов. Каждый кейс анализируется по схеме: проблема → решение → ключевое ограничение (сводные данные см. в табл. 1).

2.1. Tesla Optimus Gen2

Tesla обладает уникальным преимуществом – флотом из более четырех миллионов автомобилей, собирающих видеоданные в теновом режиме: система FSD³ непрерывно сравнивает предполагаемые действия нейросети с действиями водителя, а момент расхождения автоматически поступает в обучающую выборку [20]. Optimus Gen2 наследует этот механизм напрямую.

Архитектура построена на едином Bot Brain SoC⁴, восьми камерах без LiDAR⁵ и принципе End-to-end⁶: входные сигналы камер напрямую преобразуются в команды двигателям; VLA⁷-модуль добавляет поддержку команд на естественном языке (см. рис. 2).

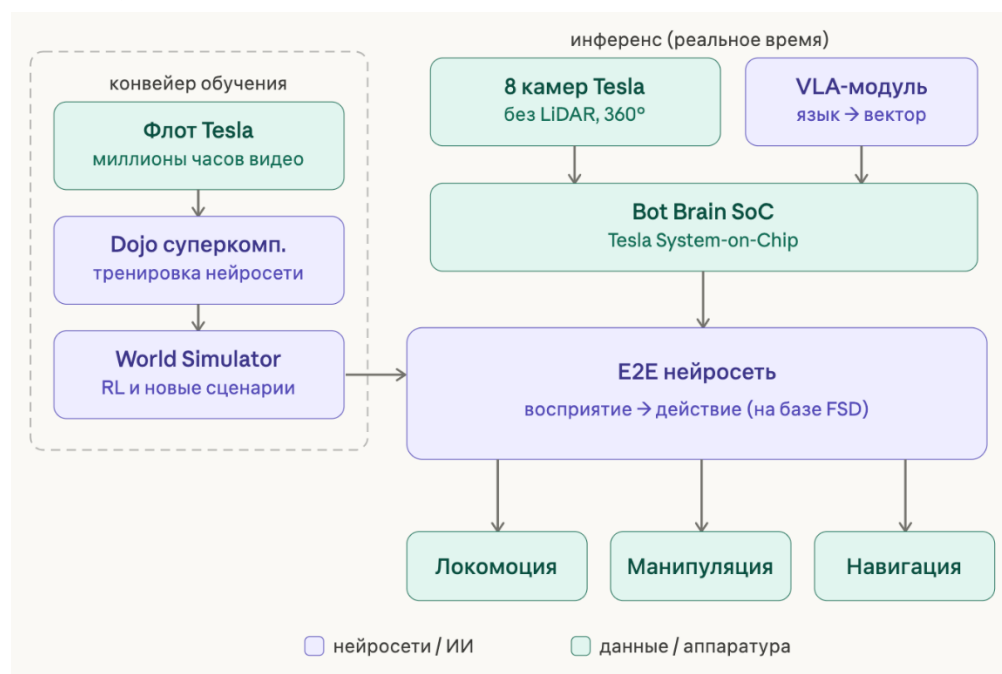


Рис. 2. Архитектура роботизированного устройства Tesla Optimus Gen2.

³ FSD (Full Self-Driving) – система полностью автономного вождения, разработанная компанией Tesla.

⁴ Bot Brain SoC (System-on-Chip) – система на кристалле; интегральная схема, объединяющая процессор, память и периферийные модули.

⁵ LiDAR (Light Detection and Ranging) – технология дистанционного зондирования, которая измеряет расстояние до объектов с помощью лазерных лучей.

⁶ End-to-end (E2E) – сквозная нейросетевая архитектура: входные данные напрямую преобразуются в выходные действия без промежуточных символических модулей.

⁷ VLA (Vision-Language-Action) – мультимодальная архитектура, объединяющая зрительное восприятие, понимание языковых команд и генерацию физических действий.

Neural World Simulator генерирует фотореалистичные сценарии на основе действий самого агента, обеспечивая замкнутые симуляции и RL на синтетических данных. Каждый час работы робота генерирует данные для улучшения нейросети, создавая нарастающий эффект, недоступный без корпоративной инфраструктуры [21].

2.2. HumanPlus (Стэнфордский университет)

Проект HumanPlus решал задачу, обратную задаче Tesla: достичь значимого результата при минимальных ресурсах. За основу был взят серийный робот Unitree H1; вся разработка сосредоточена на методологии обучения [22] (см. рис. 3).

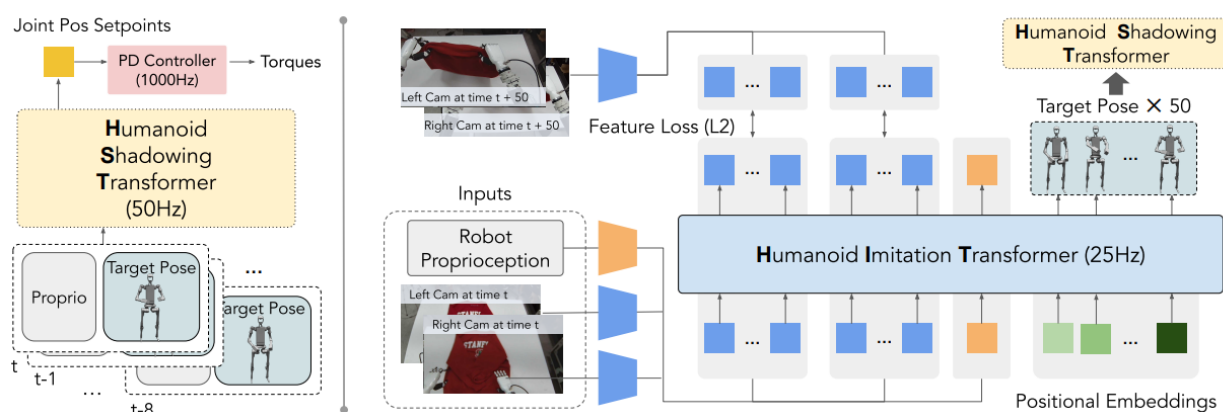


Рис. 3. Архитектура роботизированного устройства HumanPlus.

Гибридная схема состоит из трех этапов. Первый этап — обучение с подкреплением (RL) в симуляторе NVIDIA Isaac Gym для освоения базовой локомоции и баланса (что дает ускорение в 1000 раз по сравнению с реальным миром). Второй этап включает теневое копирование с системой WHAM⁸, которая восстанавливает трехмерное движение оператора из обычных камер и формирует парные данные «наблюдение → команда мотору». Третий этап — нейросетевое обучение на собранном датасете с переходом к автономии, где за 40 часов видеозаписей робот осваивает сложные двигательные навыки. Ключевое ограни-

⁸ WHAM (World-grounded Humans with Accurate Motion) — система восстановления трёхмерного движения человека в глобальной системе координат по обычным видеокерам.

чение состоит в том, что датасет покрывает только продемонстрированные действия.

2.3. XPeng Iron

XPeng решал проблему задержки в модульных архитектурах. Ответ – трех-слойная сквозная архитектура: VLM⁹ (слой понимания сцены) → VLT¹⁰ (слой внимания и планирования) → VLA (слой трансляции плана в команды двигателям) (см. рис. 4). Вход – видеопоток и текстовая команда; выход – управляющие воздействия без промежуточных символических представлений [23]. Архитектура развивается на базе семилетней автопилотной платформы XPeng. Актуальным вопросом остается задержка (latency) многослойной сети в задачах реального времени.

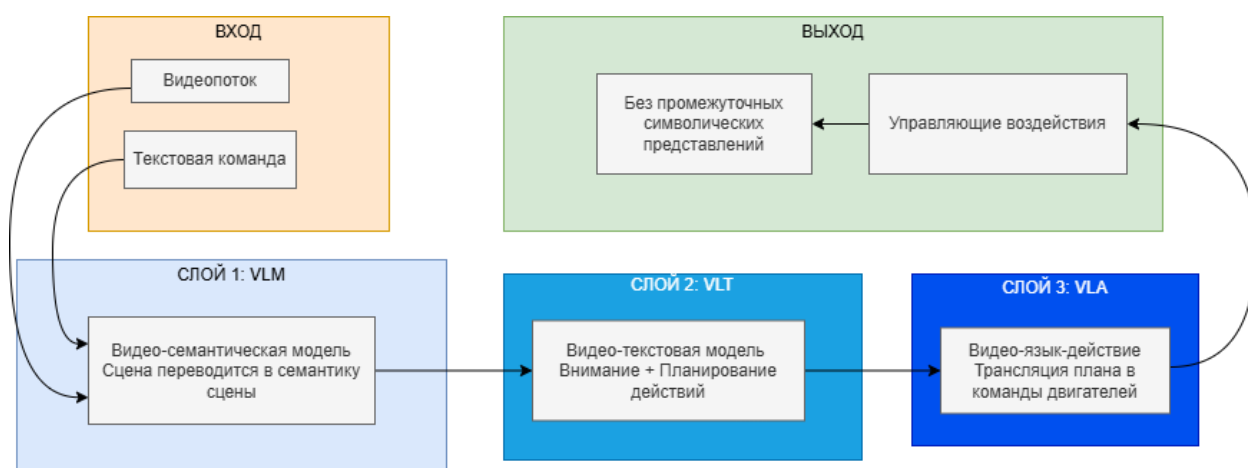


Рис. 4. Архитектура роботизированного устройства Xpeng Iron.

2.4. Figure AI

Система Figure AI основана на стратегии ресурсно-рационального стартапа: тонкая настройка готового предобученного решения вместо разработки базовой модели с нуля (см. рис. 5). Основой послужили модели OpenAI, на базе которых создана VLA-модель Helix [24]. Гибридная схема: имитационное обучение через

⁹ VLM (Vision-Language Model) – мультимодальная нейросетевая модель, обрабатывающая одновременно визуальные данные и текст.

¹⁰ VLT (Vision-Language Transformer) – трансформерная архитектура для совместной обработки зрительных и языковых данных; отвечает за механизм внимания и планирование действий.

телеоперацию реальных роботов (Helix Lab) + RL. Принципиальным ограничением является зависимость от внешней модели: архитектурные решения провайдера не находятся под контролем команды разработки.

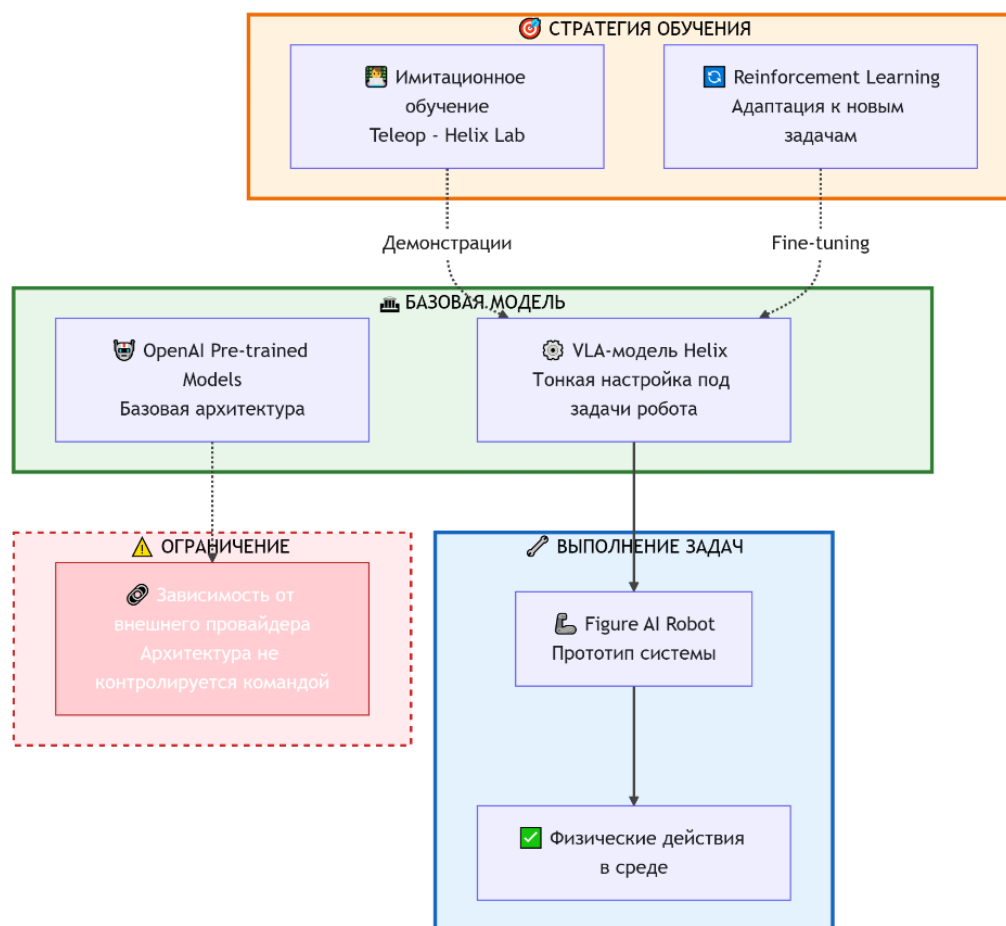


Рис. 5. Архитектура роботизированного устройства компании Figure AI.

2.5. GREEN (Сбер)

Система GREEN представляет нишу сервисных ассистентов с акцентом на диалог. Гибридная схема: GigaChat¹¹ в роли LLM-ядра (понимание команд, русскоязычный семантический контекст) + RL (адаптация к новым задачам) + VLA (связь зрительного восприятия с языковыми командами) [25].

Использование GigaChat – это обоснованное рыночное решение для русскоязычной среды. Ограничение состоит в том, что проект находится на ранней стадии, независимых метрик производительности недостаточно (см. рис. 6).

¹¹ GigaChat – большая языковая модель от Сбера. URL: <https://giga.chat/>

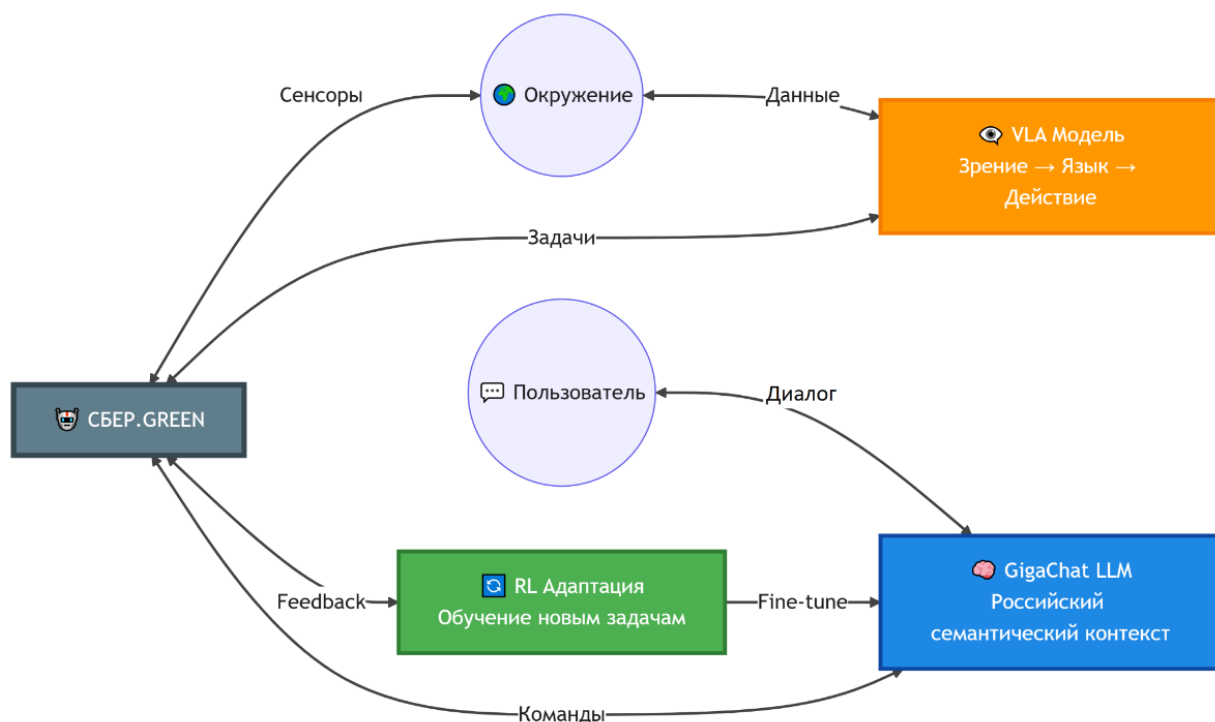


Рис. 6. Схема взаимодействия компонентов роботизированного устройства Tesla Optimus Gen2.

2.5. Сравнительный анализ и позиционирование работы

Представленные в обзоре роботизированные платформы и программные комплексы (подп. 2.1–2.5) демонстрируют разнообразие подходов к интеграции мультимодальных моделей и алгоритмов обучения с подкреплением. Каждый из рассмотренных проектов ориентирован на решение специфических задач автономного управления — от имитации действий человека до навигации в неструктурированной среде. Вместе с тем сопоставление их ключевых характеристик (см. табл. 1) выявляет общие технологические ограничения существующих решений. Как следует из табл. 1, ни одна из рассмотренных систем не предлагает воспроизводимого протокола, пригодного для ресурсно-ограниченных условий развёртывания. Система HumanPlus, наиболее близкая к постановке настоящей работы, демонстрирует высокую точность имитации, однако её применение сдерживается зависимостью от объёмного датасета демонстраций и ограниченной автономностью политика управления. Указанный исследовательский разрыв — отсутствие лёгковесного и воспроизводимого подхода к автономному

управлению на основе демонстраций оператора — определяет позиционирование настоящей работы.

Табл. 1. Сравнительный анализ гибридных подходов к обучению роботизированных устройств.

Критерий	Tesla Optimus	HumanPlus	XPeng Iron	Figure AI	GREEN
Класс	Маховик данных (data-flywheel)	Малобюджетный академический проект	Перенос автopilота (automotive transfer)	Настройка базовой модели (fine-tuning)	На основе LLM, локализованная
Проблема	Масштабирование данных без ручных демонстраций	Тяжело достичь значимого результата без дорогой инфраструктуры	Задержка в модульных системах зрения/движения	Высокая стоимость обучения с нуля	Диалог и русскоязычный контекст
Решение	E2E FSD + World Simulator + RL	RL (симуляция) + теневое копирование + имитация	VLM + VLT + VLA (трехслойный E2E)	Предобученные модели OpenAI + Helix VLA + RL	GigaChat LLM + RL + VLA
Источник данных	Флот 4+ млн авто (теневой режим)	40 ч видео оператора (WHAM)	Данные автopilота XPeng + оператор	Предобученные модели + телеоперация	GigaChat pretrain + симуляция
Ключевое ограничение	Корпоративная инфраструктура; непрозрачность автономности	Только продемонстрированные задачи	Задержка многослойной сети	Зависимость от внешней модели	Ранняя стадия; метрик нет
Воспроизводимость	Нет	Частичная (открытый код)	Нет	Нет	Нет

3. ВЫБОР ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ БАЗЫ

3.1. Виртуальные среды

Виртуальные среды позволяют обучать роботизированные устройства в тысячи раз быстрее реального мира без риска повреждения физического прототипа. Были рассмотрены четыре платформы.

Webots¹² – профессиональный открытый симулятор с высокой точностью физики и готовыми моделями реальных роботов. Недостатки: слабый графический движок затрудняет обучение с компьютерным зрением; параллельный запуск сотен симуляций требует сложной серверной настройки.

NVIDIA Isaac Sim¹³ – наиболее мощная платформа, которая использует видеокарты для параллельного обучения тысячи роботов, также включает фотореалистичный рендеринг, специализированный модуль Isaac Gym для RL. Принципиальное ограничение – это минимальное требование к графическому процессору поколения RTX 3080.

Gazebo¹⁴ – стандарт де-факто для работы с реальными роботами: нативная интеграция с ROS¹⁵, физически корректные модели датчиков. Ограничена масштабируемость параллельного обучения.

Unity ML-Agents – сотни параллельных симуляций, широкий набор сенсорных моделей и нативная интеграция с VR-гарнитурами [26, 27]. Средние требования к аппаратуре. Недостаток: физический движок PhysX¹⁶ уступает специализированным решениям по точности. Для целей данной работы выбран Unity ML-Agents: доступность и поддержка VR-интерфейса обеспечивают полный цикл от записи демонстраций до автономного обучения на единой платформе.

3.2. Физическая симуляция в Unity

В процессе разработки были сравнены компоненты Rigidbody и ArticulationBody. Rigidbody обеспечивает базовую симуляцию столкновений и гравитации, однако без корректной симуляции трения суставов; применение FixedJoint как обходного решения приводило к нереалистичному «прилипанию»

¹² Webots – открытый профессиональный симулятор робототехники.

URL: <https://cyberbotics.com>

¹³ NVIDIA Isaac Sim – фотореалистичный симулятор роботизированных устройств на базе Omniverse. URL: <https://developer.nvidia.com/isaac/sim>

¹⁴ Gazebo – открытая среда симуляции робототехники, стандарт де-факто в экосистеме ROS. URL: <https://gazebo.org>

¹⁵ ROS (Robot Operating System) – открытая программная платформа для разработки и управления роботизированными системами.

¹⁶ PhysX – это кроссплатформенный физический движок, который имитирует законы реального мира в компьютерных играх и симуляторах.

захватываемых объектов. Компонент ArticulationBody (2022) разработан специально для кинематических цепочек роботизированных устройств и обеспечивает физически корректное поведение суставов без артефактов. Для задач настоящей работы был выбран ArticulationBody.

3.3. Роль VR-гарнитуры и захват движений оператора

VR-гарнитура выполняет двойную функцию. Во-первых, обеспечивает оператору стереоскопическое восприятие от камер роботизированного устройства, что повышает качество телеуправления и записываемых демонстраций. Во-вторых, контроллеры гарнитуры служат непосредственным инструментом захвата движений для первого этапа гибридного обучения. VR-интерфейс является ключевым звеном, соединяющим предыдущие работы авторов по телеуправлению с предлагаемым подходом автономного обучения.

Среди альтернатив рассматривались классические RGB-камеры (как, например, в HumanPlus – низкая стоимость, но ограниченная точность и проблема окклюзии) и маркерные мокап-костюмы (максимальная точность, однако требуют специальной комнаты и остаются недоступными для большинства групп). VR-гарнитуры предлагают оптимальный баланс: высокая точность, практически полное отсутствие окклюзии, доступная цена. Ограничениями являются: возможный кинетоз при длительных сессиях и отсутствие тактильной обратной связи.

4. РАЗРАБОТКА И ВЕРИФИКАЦИЯ ГИБРИДНОГО ПОДХОДА

4.1. Логика гибридной схемы

Предлагаемый нами подход построен на принципе последовательной компенсации недостатков: каждый следующий этап устраняет ограничение предыдущего (см. рис. 7). Ни один из компонентов не является достаточным сам по себе – их ценность реализуется именно в цепочке.

На первом этапе оператор управляет роботизированным устройством через VR-интерфейс: он видит мир глазами робота благодаря стереоизображению с камер устройства и управляет им контроллерами. Все действия записываются в виде парных данных «наблюдение с камеры → управляющее воздействие».

Нейросеть, обученная на этом датасете, сразу получает направленное поведение. Однако она ограничена «потолком» оператора: если в датасете нет примера данной ситуации, модель ошибается.

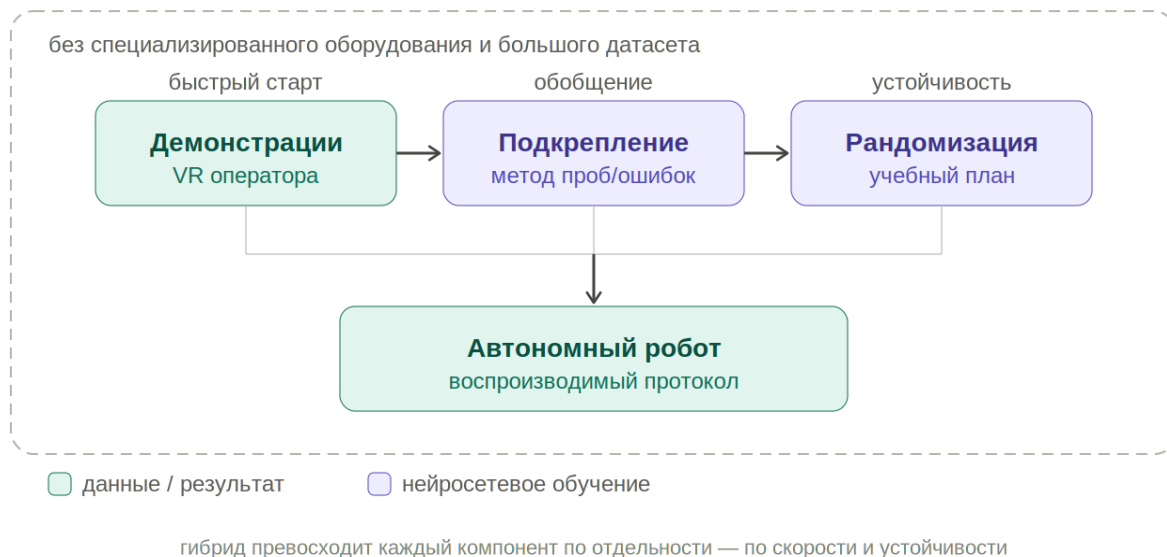


Рис. 7. Логика гибридного подхода: последовательная компенсация ограничений каждого этапа.

Второй этап снимает это ограничение. RL позволяет агенту исследовать пространство состояний самостоятельно, находить решения, которых оператор не демонстрировал, и превзойти его. Инициализация весами из первого этапа резко сокращает начальную фазу хаотичного поиска.

Третий этап формирует устойчивость. Доменная рандомизация совместно с учебным планом обеспечивает обучение на множестве вариаций среды с прогрессивно нарастающей сложностью. Схема на рис. 1 иллюстрирует логику цепочки и ее позиционирование: весь конвейер реализован на общедоступном инструментарии без специализированного оборудования.

4.2. Постановка задачи и условия экспериментов

В качестве тестовой задачи взята навигация роботизированного устройства к целевому объекту при наличии препятствия. Обучающая сцена содержит три элемента с изменяемым положением: агент, целевой объект (зеленая сфера) и препятствие (красная стена). Были проведены три контролируемых эксперимента на идентичной сцене с фиксированной функцией награды. По осям графиков: X — количество шагов (действий агента), Y — накопленная награда за эпизод.

4.3. Эксперимент 1: обучение на основе демонстраций

Средствами ML-Agents записан датасет демонстраций с вариациями взаимного расположения объектов. На рис. 8 представлен результат: награда стабильно растет с первых эпизодов и достигает плато к ~100–110 тыс. шагов – агент сразу имеет направленное поведение, унаследованное от демонстраций. Принципиальный недостаток – это низкая устойчивость: при изменении положений объектов за пределами вариаций датасета поведение деградирует.

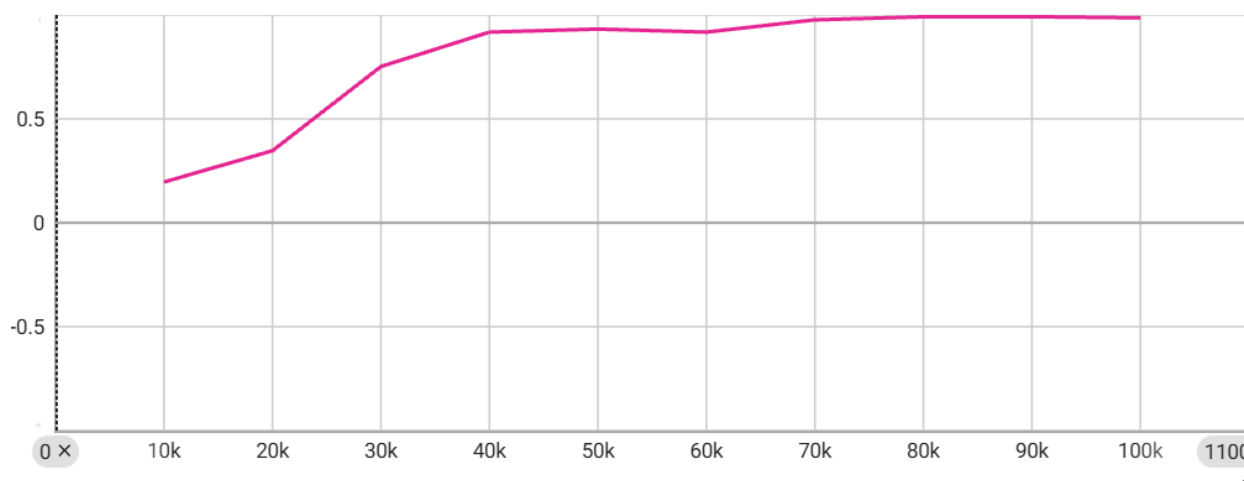


Рис. 8. Результат имитационного подхода обучения.

4.4. Эксперимент 2: обучение с подкреплением

Агент начинает с полностью случайных действий. На рис. 9 представлен результат: длительная фаза нулевой или отрицательной награды до ~250 тыс. шагов, затем резкий рост до плато к ~350–400 тыс. шагов. Достоинством является возможность превзойти оператора. Недостаток аналогичен: агент освоил конкретный маршрут, а не общую стратегию обхода.

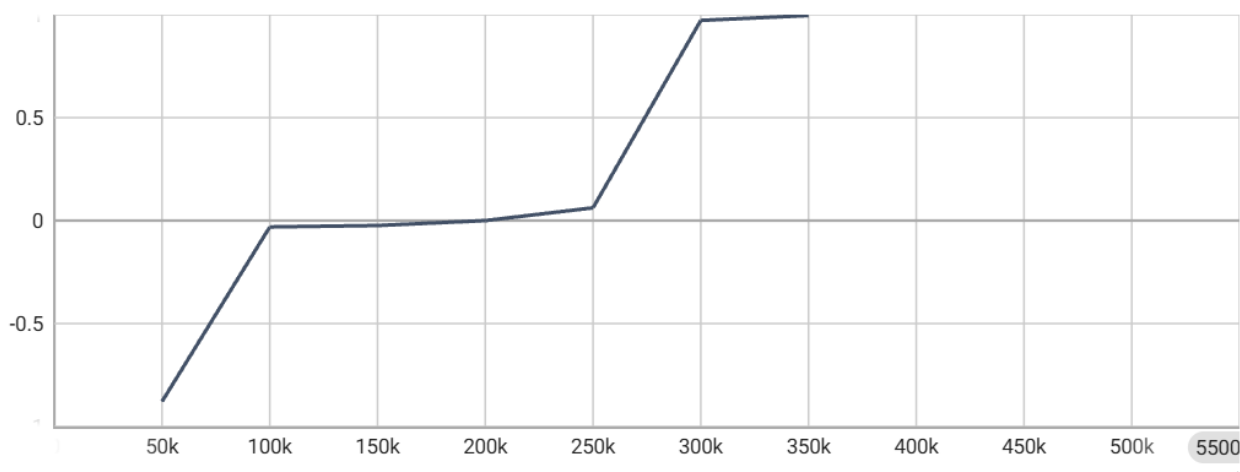


Рис. 9. Результат подхода обучения с подкреплением.

4.5. Эксперимент 3: гибридный подход

Гибридная схема была реализована в виде последовательного учебного плана.

1. Обучение на основе демонстраций в статичной сцене – инициализация направленного поведения.
2. RL с узким диапазоном рандомизации положений препятствия.
3. RL со средним диапазоном рандомизации всех ключевых объектов.
4. RL с рандомизацией по всей доступной обучающей среде.

График финального этапа показан на рис. 10: быстрый выход на положительную награду к ~75–100 тысячам шагов (от инициализации демонстрациями), повышаются устойчивость к изменениям окружающей среды и вариативность траекторий перемещения за счет незначительного снижения точности модели. Результирующая модель корректно выполняет навигацию при произвольном расположении всех объектов. Гибридный подход объединяет преимущества обоих компонентов: быстрый старт от демонстраций и устойчивость от RL с рандомизацией.

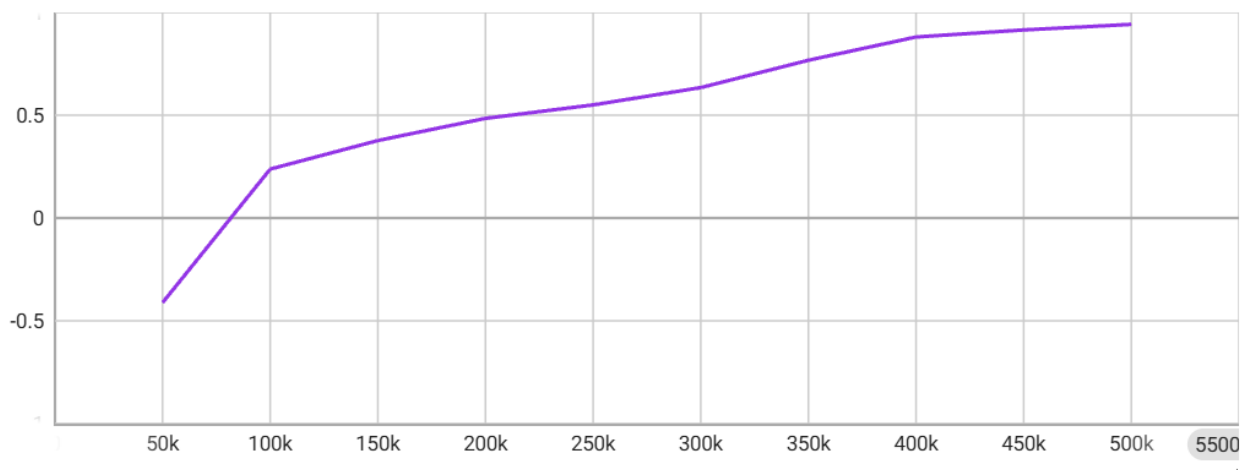


Рис. 10. Результат гибридного подхода обучения.

5. ОГРАНИЧЕНИЯ ПОДХОДА И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ

5.1. Катастрофическое забывание

Предложенный подход эффективен для обучения одному навыку с устойчивостью к изменениям среды. При переходе к мультизадачному обучению возникает системное ограничение – катастрофическое забывание: обучение новому навыку перезаписывает веса нейросети, разрушая ранее приобретенные [28]. Существуют три основных стратегии противодействия:

- буферы воспроизведения (Replay Buffers) [29] – встроенный механизм ML-Agents: данные о ранее освоенных задачах «подмешиваются» в обучающую выборку при освоении новых, постоянно напоминая сети о прошлых навыках. Не требует изменения архитектуры;
- мультизадачное обучение [30] – единая модель обучается на гетерогенном датасете, где текстовая команда задает условие текущей задачи. VLA-архитектура естественно поддерживает этот режим, однако требует значительного объема размеченных данных;
- иерархическое обучение [31] – навыки хранятся в отдельных модулях (подсетях), которыми управляет главная планировочная сеть по принципу «начальник – подчиненный». Позволяет добавлять новые навыки без перезаписи существующих, однако требует более сложной архитектуры.

Соответственно, для большей универсальности и многофункциональности можно комбинировать другие различные подходы, преимущества которых

можно объединить с другими для более эффективной работы в виде гибридного подхода.

5.2. Интеграция LLM и AI-агентов для генерации синтетических данных

Предложенный подход открывает перспективу применения LLM на этапе формирования обучающего датасета. LLM-агент может получать текстовое описание задачи и автоматически генерировать вариации демонстраций в виртуальной среде: сгенерированные последовательности действий проверяются функцией награды и при успехе добавляются в обучающую выборку.

Такой подход снял бы ключевое ограничение HumanPlus и настоящей работы – зависимость от объема реальных демонстраций оператора. Генерация синтетических демонстраций через LLM совместно с доменной рандомизацией потенциально позволяет покрыть значительно более широкое пространство состояний. Проверка этой гипотезы является следующим шагом исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен и верифицирован воспроизводимый гибридный подход к обучению автономного управления роботизированным устройством на общедоступном инструментарии без специализированного оборудования. Сравнительный анализ пяти прототипов, представляющих ключевые классы гибридных архитектур: маховик данных, малобюджетная академическая разработка, перенос автопилота, настройка предобученной базовой модели, система на основе LLM – показал: все успешные системы применяют гибридные схемы, однако ни одна не предоставляет воспроизводимого протокола для ресурсно-ограниченных условий.

Три контролируемых эксперимента в Unity ML-Agents подтвердили основной тезис: гибридная комбинация обучения на основе демонстраций, RL, учебного плана и доменной рандомизации превосходит изолированные подходы по скорости выхода на целевую награду и устойчивости к изменениям среды.

Предложенный подход формирует замкнутую цепочку с нашими предыдущими работами: от VR-телеуправления и записи стереоизображения к автономному обучению на основе собранных демонстраций. VR-интерфейс выступает не просто инструментом управления, а источником высококачественных обучающих данных.

Обозначим перспективы дальнейшей работы: применение эвристики эскалации для преодоления катастрофического забывания; использование LLM-агентов для автоматической генерации синтетических демонстраций; перенос обученной модели на физический прототип с оценкой sim-to-real gap.

Благодарности

Публикация выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения проекта № FZSM-2026-0019 «Телеуправление удаленными устройствами с использованием виртуальной реальности».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кугуракова В.В., Хафизов М.Р., Кадыров С.А., Зыков Е.Ю. Удаленное управление роботизированным устройством с использованием технологий виртуальной реальности // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35, № 3. С. 348–361. <https://doi.org/10.15827/0236-235X.139.348-361>
2. Кугуракова В.В. и др. VR-телеуправление «многорукими» устройствами: проблемы, гипотезы, постановка задачи // Электронные библиотеки. 2022. Т. 25, № 5. С. 441–471. <https://doi.org/10.26907/1562-5419-2022-25-5-441-471>
3. Зыкова А.Е., Зыков Е.Ю., Кугуракова В.В. Применение технологий виртуальной реальности для удаленного управления роботизированными устройствами // Итог. науч.-практ. конф. КФУ. Казань, 2023. С. 87. EDN GDBPQR.
4. Сергунин И.Д., Зыков Е.Ю. «РУСАК» – модульное решение системы управления удаленными устройствами с интегрированными защищенными каналами связи // Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «Робототехника». 2023. С. 265–271.
5. Кугуракова В.В., Исхаков Р.Т., Низамутдинов М.М. и др. Точечное телеуправление для сельскохозяйственной техники, выполняющей задачи на основе ИИ // Международный форум KAZAN DIGITAL WEEK – 2025: сборник материалов, Часть 1. 2025. С. 1964–1971.
6. Программа для синхронизации стереоизображения со стереопары, размещенной на удаленном двигающемся устройстве: Свидетельство о гос. рег.

программы для ЭВМ № 2022684277 / Кугуракова В.В., Хафизов М.Р., Габдуллина Д.Р.; КФУ. Зарег. 13.12.2022.

7. Программа адаптивного управления типовыми маршрутами и рутинными действиями модели робота-манипулятора в виртуальной среде: Свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ № 2024689377 / Кугуракова В.В., Исхаков Р.Т., Костюк Д.И. и др.; КФУ. Зарег. 05.12.2024.

8. *Исхаков Р.Т.* Разработка генератора большого количества вариаций движений роботизированного устройства на основе базовых записанных действий оператора: выпускная квалификационная работа: 09.03.04 «Программная инженерия» / Р.Т. Исхаков; Казанский (Приволжский) федеральный университет. Казань, 2024. 41 с.

9. *Guzaerov D.A., Sergunin I.D., Kugurakova V.V.* Infrared Video-Based Object Recognition for Agricultural Research Field Uses // BIO Web of Conferences. EDP Sciences, 2024. Vol. 141. No. 01025. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202414101025>

10. *Zare M. et al.* A survey of imitation learning: Algorithms, recent developments, and challenges // IEEE Transactions on Cybernetics. 2024. Vol. 54, No. 12. P. 7173–7186. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.02473>

11. *Arulkumaran K. et al.* Deep Reinforcement Learning: A Brief Survey // IEEE Signal Processing Magazine. 2017. Vol. 34, No. 6. P. 26–38. <https://doi.org/10.1109/MSP.2017.2743240>

12. *Kober J., Bagnell J.A., Peters J.* Reinforcement Learning in Robotics: A Survey // The International Journal of Robotics Research. 2013. Vol. 32, No. 11. P. 1238–1274. <https://doi.org/10.1177/0278364913495721>

13. *Chebotar Y. et al.* Actionable models: Unsupervised offline reinforcement learning of robotic skills // arXiv preprint arXiv:2104.07749. 2021.

14. *Bengio Y. et al.* Curriculum Learning // Proceedings of ICML. 2009. P. 41–48. <https://doi.org/10.1145/1553374.1553380>

15. *Graves A. et al.* Automated Curriculum Learning for Neural Networks // Proceedings of ICML. 2017. P. 1311–1320. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1704.03003>

16. *Chukwurah N., Adebayo A. S., Ajayi O.O.* Sim-to-real transfer in robotics: Addressing the gap between simulation and real-world performance // International Journal of Robotics and Simulation. 2024. Vol. 6, No. 1. P. 89–102.

<https://doi.org/10.54660/.IJFMR.2024.5.1.33-39>

17. Tobin J. et al. Domain Randomization for Transferring Deep Neural Networks from Simulation to the Real World // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2017. P. 23–30. doi: 10.1109/IROS.2017.8202133

18. Pinto L. et al. Robust Adversarial Reinforcement Learning // Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning (ICML). 2017.

<https://doi.org/10.48550/arXiv.1703.02702>

19. Abnar S. et al. Exploring the limits of large scale pre-training // arXiv preprint arXiv:2110.02095. 2021.

20. Tesla Optimus // teslarobots.ru. 2025. URL: <https://teslarobots.ru/> (дата обращения: 05.02.2026).

21. Brohan A. et al. RT-2: Vision-Language-Action Models Transfer Web Knowledge to Robotic Control // arXiv preprint arXiv:2307.15818. 2023.

22. Fu Z. et al. Humanplus: Humanoid shadowing and imitation from humans //arXiv preprint arXiv:2406.10454. 2024.

23. Xpeng Shares Achievements in Physical AI: Unveils XPeng VLA 2.0, Next-Gen Iron // xpeng.com. 2025. URL: <https://www.xpeng.com/pressroom/news/019a56f54fe99a2a0a8d8a0282e402b7> (дата обращения: 04.03.2026).

24. Figure AI Opens New Helix Lab to Accelerate Learning for Its Humanoid Robots // mlq.ai. 2025. URL: <https://mlq.ai/news/figure-ai-opens-new-helix-lab-to-accelerate-learning-for-its-humanoid-robots/> (дата обращения: 04.03.2026).

25. Apanasevich I. et al. Green-VLA: Staged Vision-Language-Action Model for Generalist Robots // arXiv preprint arXiv:2602.00919. 2026.

26. Yu A., Palefsky-Smith R., Bedi R. Deep reinforcement learning for simulated autonomous vehicle control // Course Project Reports: Winter. 2016. Vol. 2016. P. 1–7. URL: https://cs231n.stanford.edu/reports/2016/pdfs/112_Report.pdf

27. Done C. et al. Reinforcement Learning-Driven Prosthetic Hand Actuation in a Virtual Environment Using Unity ML-Agents // Virtual Worlds. MDPI. 2025. Vol. 4, No. 4. P. 53. <https://doi.org/10.3390/virtualworlds4040053>

28. Kirkpatrick J. et al. Overcoming Catastrophic Forgetting in Neural Networks // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2017. Vol. 114, No. 13. P. 3521–3526. <https://doi.org/10.1073/pnas.1611835114>

29. Fedus W. et al. Revisiting fundamentals of experience replay // International conference on machine learning. PMLR. 2020. P. 3061–3071. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2007.06700>
30. Caruana R. Multitask Learning // Machine Learning. 1997. Vol. 28, No. 1. P. 41–70. <https://doi.org/10.1023/A:1007379606734>
31. Pateria S. et al. Hierarchical reinforcement learning: A comprehensive survey // ACM Computing Surveys (CSUR). 2021. Vol. 54, No. 5. P. 1–35. <https://doi.org/10.1145/3453160>
-

A HYBRID APPROACH TO AUTONOMOUS CONTROL OF A ROBOTIC DEVICE THAT COMBINES REINFORCEMENT LEARNING AND OPERATOR-BASED DEMONSTRATION LEARNING

R. T. Iskhakov¹ [0009-0004-9262-7296], V. V. Kugurakova² [0000-0002-1552-4910]

^{1, 2}Kazan Federal University, Kazan, Russia

¹vlada.kugurakova@gmail.com, ²iskhakovrobert42@gmail.com

Abstract

A reproducible hybrid approach to learning autonomous control of a robotic device has been proposed and experimentally verified, implemented using publicly available tools without specialized computing hardware. The approach combines learning from operator demonstrations, reinforcement learning, curriculum learning, and domain randomization into a single sequential framework. Based on a comparative analysis of five prototypes representing key classes of architectural solutions, applicable approaches for resource-constrained environments are identified. Three controlled experiments in Unity ML-Agents demonstrated the superiority of the hybrid combination over isolated approaches in terms of both learning speed and robustness to environmental changes. Limitations associated with catastrophic forgetting are outlined, and prospects for integrating large language models to generate synthetic training data are identified.

Keywords: teleoperation, remote control, robot, virtual reality, virtual environment, machine learning, reinforcement learning, learning from demonstrations, operator demonstration, Unity, ML-Agents.

Acknowledgments

This work was funded by a grant from the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan (Agreement No. 12/2025-PD-KFU dated December 22, 2025).

REFERENCES

1. Kugurakova V.V., Khafizov M.R., Kadyrov S.A., Zykov E.Yu. Remote control of a robotic device using virtual reality // Software & Systems. 2022. Vol. 35, No. 3. P. 348–361. <https://doi.org/10.15827/0236-235X.139.348-361>
2. Kugurakova V.V. et al. VR-Telecontrol of Multi-Arm Devices: Problems, Hypotheses, Problem Statement // Russian Digital Libraries Journal. 2022. Vol. 25, No. 5. P. 441–471. <https://doi.org/10.26907/1562-5419-2022-25-5-441-471>
3. Zykova A.E., Zykov E.Yu., Kugurakova V.V. Primenenie tekhnologiy virtualnoy realnosti dlya udalennogo upravleniya robotizirovannymi ustroystvami // Itogovaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya KFU. Kazan, 2023. P. 87. EDN GDBPQP.
4. Sergunin I.D., Zykov E.Yu. «RUSAK» – modul’noe reshenie sistemy upravleniya udalonnymi ustroystvami s integrirovannymi zashchishchyonnymi kanalami svyazi // Sostoyanie i perspektivy razvitiya sovremennoj nauki po napravleniyu «Robototekhnika». 2023. P. 265–271.
5. Kugurakova V.V., Iskhakov R.T. et al. Tochechnoe teleupravlenie dlya sel’skokhozyajstvennoj tekhniki, vypolnyayushchej zadachi na osnove II // International Forum KAZAN DIGITAL WEEK – 2025: conference papers, volume 1. 2025. P. 1964–1971.
6. Programma dlya sinkhronizatsii stereoizobrazheniya so stereopary, razmeshchyonnoj na udalennom dvigayushchemsya ustrojstve: Svidetel’stvo o gos. reg. programmy dlya EVM № 2022684277 / Kugurakova V.V., Khafizov M.R. Gabdullina D.R.; KFU. Date of registration: 13.12.2022.
7. Programma adaptivnogo upravleniya tipovymi marshrutami i rutinnymi dejstviyami modeli robota-manipulyatora v virtual’noj srede: Svidetel’stvo o gos. reg. programmy dlya ЭБМ № 2024689377 / Kugurakova V.V., Iskhakov R.T. et al.; KFU. Date of registration: 05.12.2022.
8. Iskhakov R.T. Razrabotka generatora bol’shogo kolichestva variatsij dvizhenij robotizirovannogo ustrojstva na osnove bazovykh zapisannykh dejstvij op-

eratora: vypusknaya kvalifikatsionnaya rabota: 09.03.04 «Programmnaya inzheneriya» / R.T. Iskhakov; Kazan (Volga Region) Federal University. Kazan, 2024. 41 p.

9. *Guzaerov D.A., Sergunin I.D., Kugurakova V.V.* Infrared Video-Based Object Recognition for Agricultural Research Field Uses // BIO Web of Conferences. EDP Sciences, 2024. Vol. 141. No. 01025. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202414101025>
10. *Zare M. et al.* A survey of imitation learning: Algorithms, recent developments, and challenges // IEEE Transactions on Cybernetics. 2024. Vol. 54, No. 12. P. 7173–7186. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.02473>
11. *Arulkumaran K. et al.* Deep Reinforcement Learning: A Brief Survey // IEEE Signal Processing Magazine. 2017. Vol. 34, No. 6. P. 26–38. <https://doi.org/10.1109/MSP.2017.2743240>
12. *Kober J., Bagnell J.A., Peters J.* Reinforcement Learning in Robotics: A Survey // The International Journal of Robotics Research. 2013. Vol. 32, No. 11. P. 1238–1274. <https://doi.org/10.1177/0278364913495721>
13. *Chebatar Y. et al.* Actionable models: Unsupervised offline reinforcement learning of robotic skills // arXiv preprint arXiv:2104.07749. 2021.
14. *Bengio Y. et al.* Curriculum Learning // Proceedings of ICML. 2009. P. 41–48. <https://doi.org/10.1145/1553374.1553380>
15. *Graves A. et al.* Automated Curriculum Learning for Neural Networks // Proceedings of ICML. 2017. P. 1311–1320. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1704.03003>
16. *Chukwurah N., Adebayo A.S., Ajayi O.O.* Sim-to-real transfer in robotics: Addressing the gap between simulation and real-world performance // International Journal of Robotics and Simulation. 2024. Vol. 6, No. 1. P. 89–102. <https://doi.org/10.54660/IJFMR.2024.5.1.33-39>
17. *Tobin J. et al.* Domain Randomization for Transferring Deep Neural Networks from Simulation to the Real World // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2017. P. 23–30. <https://doi.org/10.1109/IROS.2017.8202133>
18. *Pinto L. et al.* Robust Adversarial Reinforcement Learning // Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning (ICML). 2017. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1703.02702>

19. *Abnar S. et al.* Exploring the limits of large scale pre-training // arXiv preprint arXiv:2110.02095. 2021.
20. Tesla Optimus // teslarobots.ru. 2025. URL: <https://teslarobots.ru/> (accessed at 05.02.26)
21. *Brohan A. et al.* RT-2: Vision-Language-Action Models Transfer Web Knowledge to Robotic Control // arXiv preprint arXiv:2307.15818. 2023.
22. *Fu Z. et al.* Humanplus: Humanoid shadowing and imitation from humans // arXiv preprint arXiv:2406.10454. 2024.
23. Xpeng Shares Achievements in Physical AI: Unveils XPeng VLA 2.0, Next-Gen Iron // xpeng.com. 2025. URL: <https://www.xpeng.com/pressroom/news/019a56f54fe99a2a0a8d8a0282e402b7> (accessed: March 4, 2026)
24. Figure AI Opens New Helix Lab to Accelerate Learning for Its Humanoid Robots // mlq.ai. 2025. URL: <https://mlq.ai/news/figure-ai-opens-new-helix-lab-to-accelerate-learning-for-its-humanoid-robots/> (accessed: March 4, 2026)
25. *Apanasevich I. et al.* Green-VLA: Staged Vision-Language-Action Model for Generalist Robots // arXiv preprint arXiv:2602.00919. 2026.
26. *Yu A., Palefsky-Smith R., Bedi R.* Deep reinforcement learning for simulated autonomous vehicle control // Stanford University Course Project Reports: Winter. 2016. P. 1–7.
URL: https://cs231n.stanford.edu/reports/2016/pdfs/112_Report.pdf
27. *Done C. et al.* Reinforcement Learning-Driven Prosthetic Hand Actuation in a Virtual Environment Using Unity ML-Agents // Virtual Worlds. MDPI. 2025. Vol. 4, No. 4. P. 53. <https://doi.org/10.3390/virtualworlds4040053>
28. *Kirkpatrick J. et al.* Overcoming Catastrophic Forgetting in Neural Networks // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2017. Vol. 114, No. 13. P. 3521–3526. <https://doi.org/10.1073/pnas.1611835114>
29. *Fedus W. et al.* Revisiting fundamentals of experience replay // International conference on machine learning. 2020. P. 3061–3071.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2007.06700>
30. *Caruana R.* Multitask Learning // Machine Learning. 1997. Vol. 28. P. 41–70. <https://doi.org/10.1023/A:1007379606734>
31. *Pateria S. et al.* Hierarchical reinforcement learning: A comprehensive survey // ACM Computing Surveys (CSUR). 2021. Vol. 54, No. 5. P. 1–35.

<https://doi.org/10.1145/3453160>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



ИСХАКОВ Роберт Тагирович – лаборант-исследователь кафедры индустрии разработки видеоигр Института информационных технологий и интеллектуальных систем Казанского (Приволжского) федерального университета, магистр. Зона научных интересов: формальные методы верификации и переноса обученных моделей на разнородные агенты.

Robert Tagirovich ISKHAKOV – research assistant at the department of Video Game Development Industry at the Institute of Information Technology and Intelligent Systems (ITIS), Kazan Federal University (KFU), Master's degree in Software Engineering. Research interests include the formal methods for verification and transfer of trained models to heterogeneous agents.

email: iskhakovrobert42@gmail.com

ORCID: 0009-0004-9262-7296



КУГУРАКОВА Влада Владимировна – кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой индустрии разработки видеоигр (КИРВИ) Института информационных технологий и интеллектуальных систем (ИТИС) Казанского федерального университета (КФУ). Область научных интересов – формальные методы верификации видеоигр.

Vlada Vladimirovna KUGURAKOVA – PhD, Head of the Department of Video Game Development Industry (GD Chair) at the Institute of Information Technology and Intelligent Systems (ITIS) of Kazan Federal University (KFU). Research interests include the formal methods of video game verification.

email: vlada.kugurakova@gmail.com

ORCID: 0000-0002-1552-4910

Материал поступил в редакцию 25 июня 2026 года

ИНСТРУМЕНТЫ ПОДДЕРЖКИ ОРИЕНТИРОВАННОГО НА ИГРОКА НАРРАТИВА В ИГРАХ С ОТКРЫТЫМ МИРОМ

В. В. Кугуракова¹ [0000-0002-1552-4910], М. В. Кочакова² [0009-0004-2760-7846],

В. В. Липатов³ [0009-0006-4070-0310]

^{1, 3}Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

²Институт бизнеса и дизайна, г. Москва, Россия

¹vlada.kugurakova@gmail.com, ²narratorika@gmail.com, ³lipatovvv95@gmail.com

Аннотация

В видеоиграх с открытым миром классические инструменты драматургического анализа – трехактная структура, кривая Фрейтага, путь героя – перестают описывать реальный игровой опыт: игрок получает свободу выбора последовательности прохождения модульного контента, что делает невозможным авторский контроль темпоритма. В работе введена концепция *storytelling literacy* – компетенция игрока, включающая распознавание эмоциональной тональности контента, осознанное конструирование пейсинга и нарративное фреймирование собственной игровой траектории. На основе формальной модели нарративного состояния игрока – адаптации аппарата сюжетных объектов, фаз, граней и пороговых состояний – предложена архитектура ИТ-системы поддержки нарратива, ориентированного на игрока. Система включает движок нарративного состояния (*feedback loop* между телеметрией действий и контентной подсистемой), инструменты визуализации траектории для игрока, инструменты анализа нарративного покрытия для дизайнера и модуль адаптивной генерации контента на основе больших языковых моделей.

Ключевые слова: видеоигры, открытые миры, нарративный дизайн, *storytelling literacy*, пейсинг, модульный нарратив, *player agency*, процедурная генерация контента, движок нарративного состояния, *game literacy*.

ВВЕДЕНИЕ

Открытые миры¹ стали доминирующей парадигмой современного геймдизайна. От *The Elder Scrolls V: Skyrim* до *Elden Ring*, от *The Legend of Zelda: Breath of the Wild* до *Assassin's Creed* – игроки получают беспрецедентную свободу в выборе последовательности прохождения контента. Однако эта свобода порождает фундаментальную проблему: классические инструменты нарративного анализа, основанные на линейных структурах [1–4], таких как трехактная структура, путь героя, кривая Фрейтага (пирамида нарастания – кульминации – развязки), не работают как описательные модели игрового опыта в открытых мирах.

В линейных играх дизайнер контролирует темпоритм: за напряженным боем следует диалоговая сцена, после кульминации – передышка для рефлексии. В модульных открытых мирах дизайнер создает палитру независимых контентных единиц, не зная, в какой последовательности игрок их пройдет. Такая ситуация послужила основой центральной гипотезы настоящей работы: в играх с открытыми мирами функция нарративного архитектора переходит от дизайнера к игроку, и это требует нового типа компетенции – *storytelling literacy*.

Российские исследования [5, 6] также обозначили эту проблему, показав, что традиционные инструменты прототипирования сценариев не учитывают возможности игрока самостоятельно конструировать последовательность из готовых модулей, а не просто выбирать между ветвями.

Цели настоящей работы заключались в следующем: (1) формализовать концепцию *storytelling literacy* [7] и показать ее место среди смежных понятий; (2) предложить формальную модель нарративного состояния игрока, пригодную для вычислительной реализации; (3) описать архитектуру ИТ-системы поддержки *player-driven-нарратива*, включая алгоритмическое ядро – движок нарративного состояния.

¹ Открытый мир (*open world*) — тип игрового пространства, в котором игрок имеет свободу исследования виртуального мира и выбора последовательности прохождения игрового контента без жестко заданной линейной структуры. В отличие от уровней игр с фиксированной последовательностью локаций, открытые миры позволяют игроку самостоятельно определять маршрут и порядок выполнения заданий.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ И ЛАКУНА

1.1. Существующие подходы

Концепция эмерджентного нарратива (emergent narrative) восходит к “Rules of Play” [8]: embedded narrative – заранее написанная история – противопоставляется emergent narrative, возникающему из взаимодействия игровых систем. Классическими примерами являются *The Sims* и *Dwarf Fortress*, где драматические истории рождаются из процедурных правил без авторского замысла. Эта концепция описывает системную эмерджентность, но не осознанное конструирование игроком своей нарративной арки.

Понятие player as author в [9] рассматривают в контексте ветвящихся нарративов (branching narratives), где дизайнер заранее прописывает все возможные пути, а игрок выбирает между ними. В таких структурах – *The Witcher*, *Detroit: Become Human*, *Life is Strange* – темпоритм контролируется дизайнером на каждой ветви: игрок выбирает, какую историю рассказать, но не как ее структурировать. В модульных открытых мирах механизм принципиально иной.

Концепция player agency – способности игрока влиять на игровой мир – широко обсуждается в game studies. В [10] развита идея присвоения игры игроком (player appropriation): игрок присваивает игру, создавая смыслы и практики, не заложенные дизайнерами. В [11] исследованы телесный опыт и физическое конструирование пути через игровое пространство. Речь идет о присвоении игры игроком (возможность играть в игру различными вариантами) – игровом процессе, который идет вразрез с авторским замыслом. Это важно, но не описывает ситуацию, когда игра изначально спроектирована как конструктор, предоставляющий игроку инструменты для самостоятельной нарративной архитектуры.

В [12] сказано о способности игр убеждать через действия, а не через тексты, когда игрок самостоятельно конструирует последовательность процедур событий. Это принципиально новая ситуация: игрок становится не только исполнителем, но и режиссером собственного эмоционального опыта.

Пространственный подход к нарративному дизайну – environmental storytelling [13] и ergodic literature [14] – фокусируется на умении читать пространство (spatial literacy), но почти не касается умения выстраивать последовательность со-

бытий во времени (temporal narrative literacy). Формальный математический аппарат вероятностно-временного моделирования игровых систем [15] описывает перемещения игрока в нарративном пространстве, однако рассматривает темпоритм как функцию дизайнера, а не компетенцию игрока. Концепция game literacy [16] охватывает понимание механик и правил, но не нарративную компетенцию.

Отдельного внимания заслуживает понятие пейсинга (pacing) – темпа и ритма подачи событий и контента, характера чередования интенсивных и медитативных эпизодов [17]. В линейных нарративах пейсинг является инструментом дизайнера: он встроен в структуру произведения и воспринимается читателем или зрителем как данность. В модульных открытых мирах контроль пейсинга переходит к игроку, и именно это делает storytelling literacy не просто желательной, но необходимой компетенцией.

Особое место среди существующих подходов занимает работа [18], в которой формализована связь нарратива и геймплея через систему сюжетных объектов, фаз, событий и правил активации механик. Собственно этот аппарат лежит в основе формальной модели, предложенной в настоящей статье (разд. 4).

1.2. Ключевая лакуна

Анализ литературы показал, что существующие исследования описывают возникновение историй из системного взаимодействия, дизайн линейных и ветвящихся арок, интерпретацию environmental storytelling, player agency и game literacy, а также влияние личностных характеристик игрока на нарративные предпочтения [19]. Однако за рамками рассмотрения остаются: (а) осознанное применение игроками драматургических принципов к выстраиванию собственной последовательности в модульной структуре; (б) пейсинг как инструмент игрока, а не только дизайнера; (в) технологическая поддержка этого процесса через ИТ-инструменты. Настоящая статья направлена на заполнение данной лакуны.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ И ЛАКУНА

2.1. Два типа нелинейности

Принципиально важно разграничить два типа нелинейного нарративного дизайна, которые нередко отождествляют.

Ветвящийся нарратив (*The Witcher 2*, *Detroit: Become Human*): автор создает несколько заранее написанных путей (рис. 1); выбор игрока определяет, какую из заготовленных арок он проживет; темпоритм контролируется дизайнером в каждой ветви. Число реализаций конечно и задано заранее.

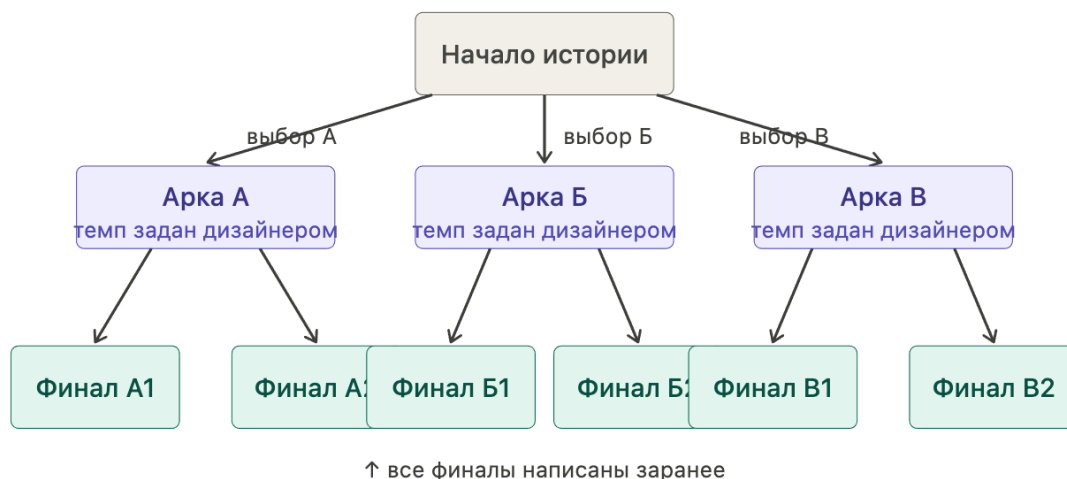


Рис. 1. Ветвящийся нарратив: дизайнер заранее задает конечное множество арок и темпоритм каждой ветви; игрок выбирает путь, но не конструирует его структуру.

Модульный конструктор: контент представлен как набор относительно независимых модулей – квестов, активностей, локаций; игрок самостоятельно определяет их последовательность (рис. 2); дизайнер не может предсказать, в какой момент игрок пройдет тот или иной контент. В *Zelda: Breath of the Wild* можно отправиться к финальному боссу сразу после пролога или через 100 часов исследования.

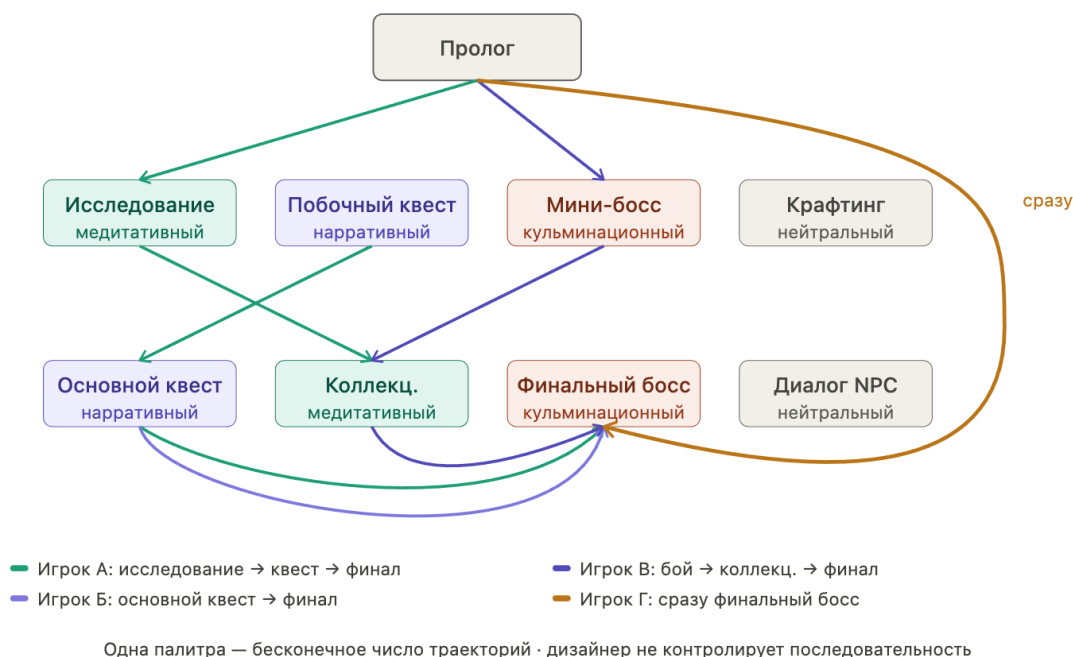


Рис. 2. Модульный конструктор: дизайнер создает палитру независимых контентных модулей с разными драматургическими функциями; игрок самостоятельно определяет последовательность, в том числе может перейти к финальному боссу сразу после пролога (красная стрелка).

Именно в модульных системах возникает проблема: кто отвечает за драматургическую структуру, если дизайнер не контролирует последовательность. В *Assassin's Creed Odyssey* три параллельные сюжетные линии – семейная драма, заговор Культа, мифологический пласт – могут проходиться в произвольном порядке; итоговая эмоциональная арка определяется не дизайном, а выбором игрока.

2.2. Дизайнер как создатель палитры

Анализ открытых миров показал, что дизайнеры фактически создают не историю, а палитру нарративных инструментов с различными эмоциональными тонами: интенсивные и медитативные активности, трагедию и комедию, социальное взаимодействие и одиночество, экшен и исследование [17]. В *Zelda: Breath of the Wild* это явно отражено в типологии контента:

- intense (битвы с противниками);
- contemplative (сбор материалов, поиск коллекционных предметов);
- narrative (восстановление воспоминаний главного героя);

- puzzle (головоломки в святилищах);
- exploration (поиск, исследование, активация башен).

Дизайнерская философия проекта, изложенная разработчиками Nintendo [20], прямо позиционирует игру как систему инструментов для самостоятельного конструирования опыта.

Задача дизайнера состоит в том, чтобы обеспечить разнообразие палитры, задача игрока – выбрать последовательность использования красок для создания собственной картины. Именно для решения этой задачи требуется *storytelling literacy*.

3. КОНЦЕПЦИЯ STORYTELLING LITERACY

3.1. Определение и уровни компетенции

Опираясь на понятие *game literacy* [16] – способности читать игровые системы, понимать механики и эффективно с ними взаимодействовать, мы предлагаем дополнить его концепцией *storytelling literacy*: способностью игрока осознанно конструировать собственную нарративную арку из модульных элементов игры путем применения драматургических принципов к последовательности собственных действий.

Концепция включает три уровня компетенции.

Уровень 1 – распознавание эмоциональной тональности контента. Базовый уровень: интуитивное ощущение разницы между «тяжелым» и «легким» квестами. Продвинутый уровень: осознанная категоризация контента по параметрам эмоциональной тональности (трагедия, комедия, эпос, лиризм, хоррор), интенсивности, когнитивной нагрузки и социальности. В *The Elder Scrolls V: Skyrim* опытный игрок, только что завершивший напряженное подземелье, распознает квест «A Night to Remember» как эмоциональную разрядку и «The Taste of Death» как неподходящий для текущего момента.

Уровень 2 – конструирование пейсинга и ритма. Осознанное чередование типов контента для создания волновой эмоциональной динамики: нарастание напряжения – кульминация – развязка – ритмическое чередование. В *Elden Ring* это может выглядеть как исследование новой локации → серия попыток победить сложного босса → спокойный сбор материалов в освоенных зонах → подготовка

к следующему вызову. Данная последовательность функционально аналогична тому, как сценарист выстраивает чередование сцен действия и диалога.

Уровень 3 – нарративное фреймирование опыта. Наложение на механические действия нарративного смысла: определение «главной истории» и «побочных эпизодов», придание смысла механике через нарративную линзу, создание момента завершения. В *Red Dead Redemption 2* игрок может пройти одну и ту же механическую игру как историю искупления, историю упадка или историю исследователя в зависимости от выбора фокуса и последовательности.

Иллюстрацией осознанного применения storytelling literacy служит случай прохождения *Assassin's Creed Origins*, когда после интенсивной кульминации основного сюжета (месть убийце сына) был выбран дополнительный квест «Обещание Байека»: медитативный сбор каменных кругов-созвездий по всей карте открытого мира. Нарративно квест стал развязкой – прощанием героя с сыном и завершением цикла горевания. Механически он полностью соответствовал текущей потребности в спокойном исследовательском опыте после перегрузки. Примечательно, что эта роль «развязки» не была закреплена за квестом разработчиками, она была сконструирована самим игроком осознанно, с опорой на знание законов драматургии.

3.2. Отличия от смежных концепций

Соотношение концепции storytelling literacy со смежными представлено в табл. 1.

Ключевым отличием является активное применение драматургических знаний к конструированию собственного опыта, а не просто понимание систем или восприятие заданного нарратива.

Таблица 1. Сравнение storytelling literacy со смежными концепциями.

Концепция	Фокус	Отличие от storytelling literacy
Game literacy [16]	Понимание игровых систем и механик	Функциональность, не эмоциональная динамика
Procedural literacy [21]	Понимание алгоритмов и правил	Техническое понимание систем, не нарративное конструирование

Player agency [9]	Способность влиять на игровой мир	Возможность выбора без обязательного нарративного осознания
Narrative comprehension [22]	Понимание заданной истории	Пассивное восприятие, неактивное создание
Personality-based narrative adaptation [19]	Адаптация нарратива к личностным чертам игрока	Персонализация без компетенции: система адаптируется, но игрок не конструирует арку осознанно
Storytelling literacy [7]	Активное конструирование нарративной арки	Применение драматургических принципов к собственной последовательности действий

4. ФОРМАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ НАРРАТИВНОГО СОСТОЯНИЯ ИГРОКА

4.1. Исходный формальный аппарат

Для перехода от описательных категорий к вычислимым структурам необходима формальная модель. В [18] предложен аппарат, в котором сюжет описан через систему объектов: протагонист с набором граней (измеримых характеристик) и сюжетные линии. Сюжет представлен как набор событий, распределенных по фазам; состояния объектов заданы численно на отрезке $[0, 100]$ с пороговыми зонами (отрицательная, нейтральная, положительная); события изменяют состояния, а пороговые переходы отображают активацию игровых механик (см. рис. 3).

Данная система разработана для заданного автором линейного сюжета, где дизайнер заранее определил объекты, события и соответствующие им механики. Для открытых миров необходимо ее переосмысление в перспективе, ориентированной на игрока (player-centered): единицей анализа становится не выстроенный автором сюжет, а личная последовательность модулей контента, выбранная игроком.

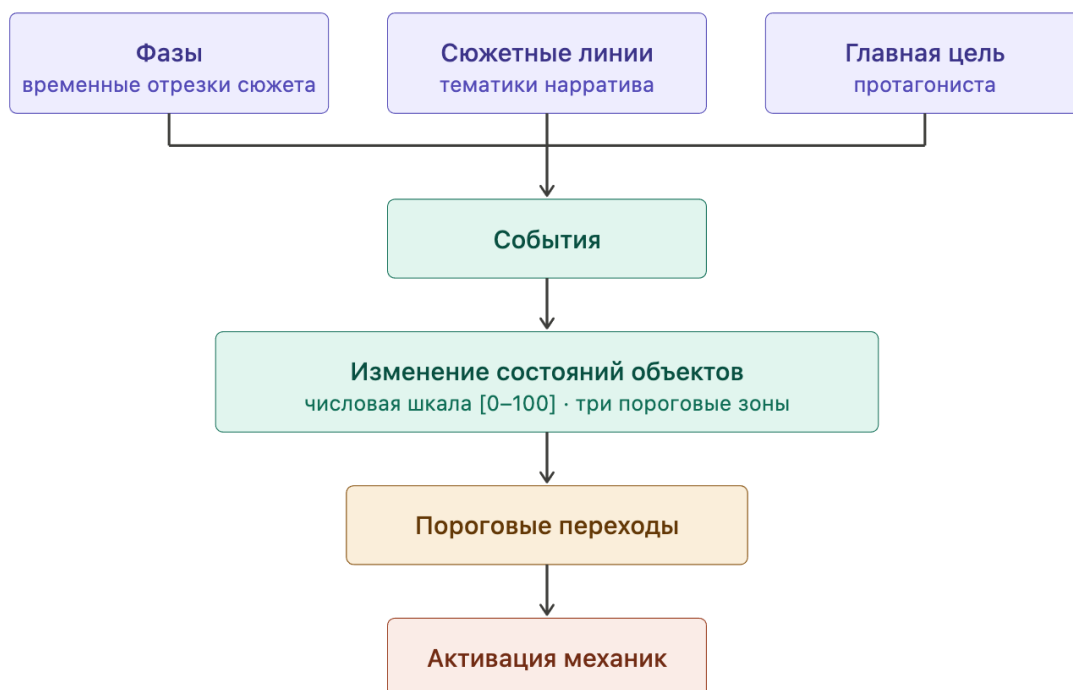


Рис. 3. Формализация сюжета как системы фаз, линий и событий (по [18]): фазы, сюжетные линии и главная цель протагониста порождают события, которые изменяют состояния объектов по шкале [0–100]; при достижении пороговых значений происходят переходы, активирующие игровые механики.

4.2. Объекты модели

В системе, ориентированной на игрока, целесообразно выделить три группы объектов.

Контентные линии: основные и побочные квесты, исследовательские эпизоды, боевые столкновения, ритуалы коллекционирования, социальные взаимодействия, катсцены, процедурно сгенерированные события. Они играют роль модульных «сюжетных линий», доступных игроку в произвольной последовательности.

Грани нарративного состояния игрока – операциональные параметры игрового опыта: эмоциональная интенсивность, когнитивная нагрузка, чувство риска, чувство контроля, уровень вовлеченности, ощущение незавершенности, потребность в разрядке, потребность в кульминации. Каждый параметр задается на отрезке [0, 100] с пороговыми зонами, аналогично граням протагониста в [18].

Текущая нарративная цель игрока – ситуативная и не всегда осознаваемая установка: «дожать драму», «переключиться на спокойный режим», «заккрыть

эмоциональный хвост», «вернуть чувство вызова», «не завершать игру слишком резко». Именно она позволяет системе интерпретировать один и тот же модуль по-разному в зависимости от общего состояния траектории (см. рис. 4).

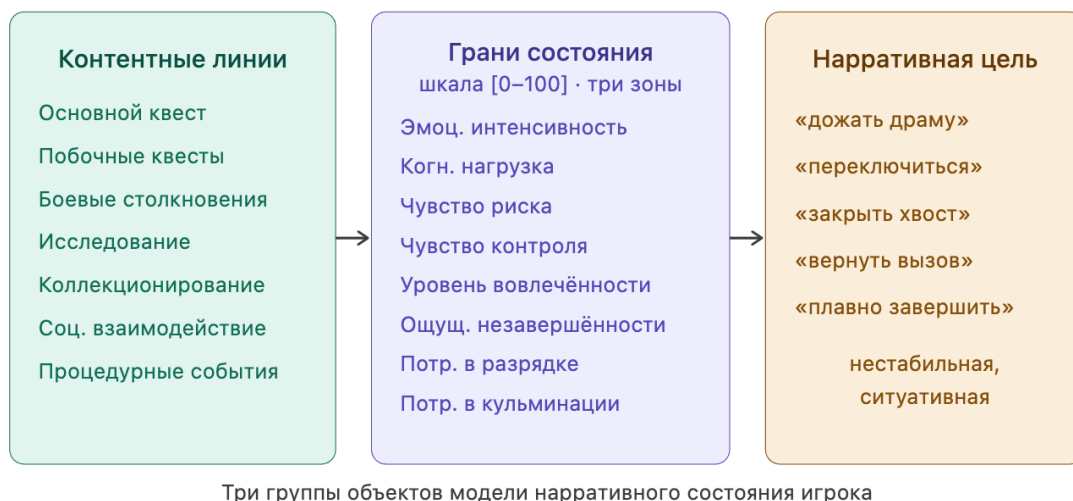


Рис. 4. Формализация нарративного состояния игрока: три группы объектов модели – контентные линии (типология активностей), грани состояния (восемь нормированных параметров в диапазоне [0–100]) и нарративная цель (ситуативно формируемое намерение игрока).

4.3. События и фазы

В авторской системе [18] события локализованы в фазах и изменяют состояния объектов между фазами. В контексте открытого мира фазы удобнее понимать как отрезки игровой траектории – сессии, крупные эпизоды, завершённые игровые циклы или блоки активности, внутри которых опыт относительно однороден.

Событиями становятся прохождение квеста, поражение от босса, успешное исследование новой зоны, серия рутинных действий, получение нарративно значимой реплики, открытие локации, переключение на коллекционирование, длительное отсутствие сюжетного продвижения. Каждое событие изменяет значения граней нарративного состояния игрока согласно матрице весов.

Оценка граней выполняется косвенно, через поведенческие прокси: система интерпретирует телеметрию действий как сигналы об изменении параметров состояния согласно матрице весов, связывающей типы событий с гранями

нарративного состояния (формальное описание этой матрицы дано разделе 5.1). Прямой самоотчет игрока и аффективные модели [23] рассматриваются как расширения системы, обеспечивающие более точную оценку за счет явного участия игрока или дополнительных сенсорных данных.

Пороговая логика делает возможным построение рабочих инструментов, а не только аналитических описаний: высокий уровень интенсивности при низком чувстве контроля интерпретируется как зона перегрузки; длительная нейтральность без значимых изменений – как стагнация; слишком частые скачки между полюсами – как избыточная изменчивость траектории.

4.4. Оценка граней нарративного состояния

Грани нарративного состояния не наблюдаемы напрямую, они выводятся из доступных данных. Можно выделить три уровня оценки с возрастающей точностью и сложностью реализации.

Уровень 1 – поведенческие прокси. Базовый уровень, реализуемый без участия игрока. Каждая грань отображается на набор наблюдаемых поведенческих индикаторов (табл. 2).

Значения пересчитываются согласно формуле обновления вектора (п. 5.1.1) при каждом событии телеметрии.

Уровень 2 – самоотчет игрока. Периодические микроопросы в конце сессии или явные элементы управления («хочу больше экшена/тишины»). Обеспечивают прямую валидацию поведенческих прокси, но требуют участия игрока и потенциально снижают иммерсию. Целесообразны на этапе калибровки системы.

Уровень 3 – аффективные модели. Оценка на основе физиологических данных (частота сердечных сокращений, электродермальная активность) или поведенческих паттернов, обработанных методами машинного обучения – в рамках подхода EDPCG [23]. Обеспечивают наибольшую точность, однако требуют либо дополнительного сенсорного оборудования, либо значительного объема обучающих данных.

В базовой реализации системы поддержки нарратива достаточно уровня 1. Уровни 2 и 3 рассматриваются как расширения, повышающие точность оценки при наличии соответствующей инфраструктуры; их интеграция в архитектуру движка нарративного состояния описана в разд. 5.

Табл. 2. Сравнение storytelling literacy со смежными концепциями.

Грань	Поведенческий прокси
Эмоциональная интенсивность	Доля интенсивного контента за последние N минут
Когнитивная нагрузка	Частота переключений между типами активностей
Чувство риска	Соотношение поражений и попыток в боевом контенте
Чувство контроля	Доля успешно завершенных активностей
Уровень вовлеченности	Длительность сессии без перерывов
Ощущение незавершенности	Число начатых, но не завершенных квестов
Потребность в разрядке	Длина непрерывной интенсивной последовательности
Потребность в кульминации	Время с момента последнего кульминационного события

5. АРХИТЕКТУРА ИТ-ИНСТРУМЕНТОВ ПОДДЕРЖКИ НАРРАТИВА

5.1. Общая архитектура: движок нарративного состояния

Все предлагаемые инструменты объединены в единый вычислительный модуль – движок нарративного состояния (Narrative State Engine, NSE). Его ключевая особенность – циклический, а не линейный характер работы (см. рис. 5):

- телеметрия действий игрока → классификатор событий;
- классификатор событий → обновление вектора нарративного состояния;
- вектор состояния → пороговый детектор фаз;
- детектор фаз → три параллельных выхода: рекомендательная подсистема / интерфейс визуализации для игрока / генеративный модуль;
- выходы → модификация игрового контента и интерфейса; игрок реагирует на измененный контент → новый цикл телеметрии.

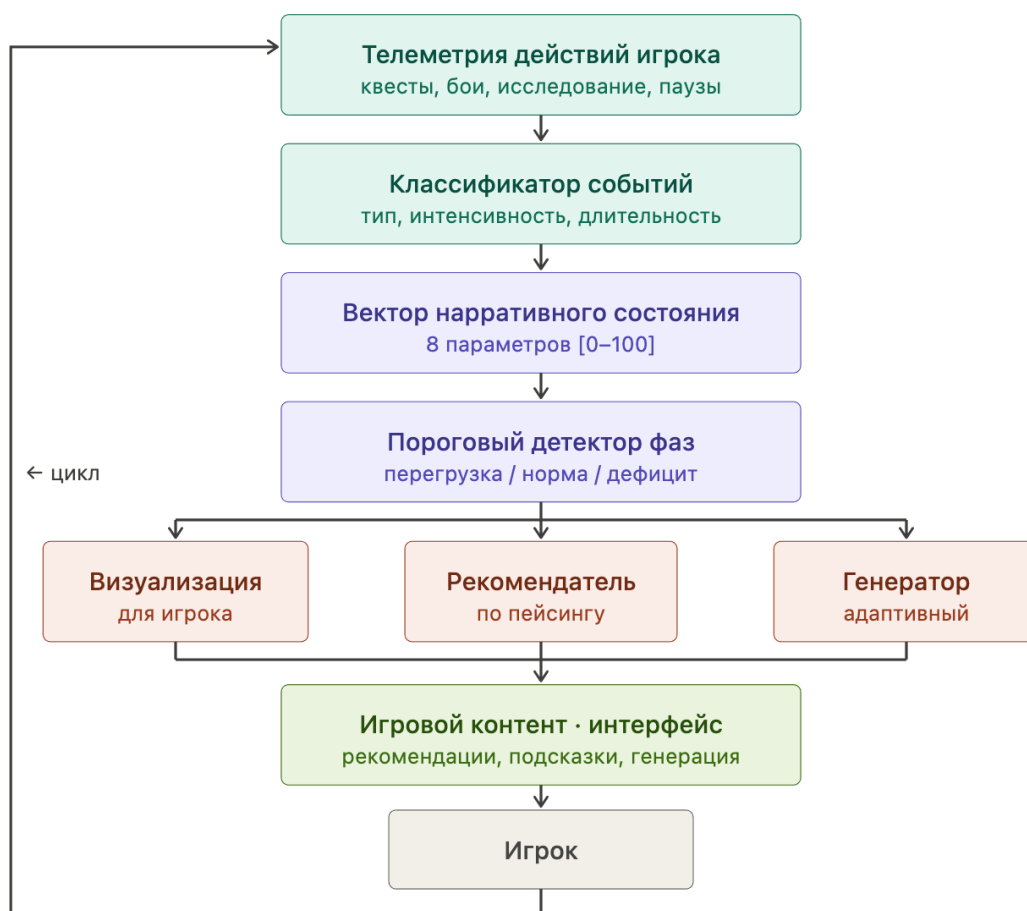


Рис. 5. Архитектура NSE: замкнутый контур обратной связи (feedback loop) от телеметрии действий через классификатор и пороговый детектор к трем исполнительным подсистемам (визуализация, рекомендатель, генератор адаптивного контента) и обратно к игроку.

Таким образом, NSE работает в контуре обратной связи между игроком и игровым миром, а не как внешний «советчик». Система не навязывает единственно верную интерпретацию, а поддерживает слой вычислительной интерпретации – делает процесс нарративного конструирования более осознанным, читаемым и технологически расширяемым (см. рис. 6). Замкнутый контур обратной связи между состоянием игрока и игровым контентом является стандартной архитектурой адаптивных игровых систем [24].



Трёхуровневая архитектура ИТ-системы поддержки player-oriented нарратива

Рис. 6. Трёхуровневая архитектура ИТ-системы поддержки ориентированного на игрока нарратива: инструменты игрока и инструменты дизайнера взаимодействуют с движком нарративного состояния (NSE) через слои передачи данных состояния и конфигурации; NSE формирует сигнал генерации для подсистемы адаптивного контента.

Формальная спецификация алгоритма NSE

Определим систему формально. Пусть нарративное состояние игрока в момент времени t представлено вектором

$$s(t) = (s_1, s_2, \dots, s_8) \in [0, 100]^8,$$

где степень размерности 8 соответствует восьми граням нарративного состояния (см. рис. 2), а каждый параметр s_i принимает значения на отрезке $[0, 100]$: s_1 — эмоциональная интенсивность, s_2 — когнитивная нагрузка, s_3 — чувство риска, s_4 — чувство контроля, s_5 — уровень вовлеченности, s_6 — ощущение незавершенности, s_7 — потребность в разрядке, s_8 — потребность в кульминации.

Пусть E — конечное множество типов игровых событий, задаваемое дизайнером при настройке системы. Типовой состав E включает прохождение квеста, поражение от босса, успешное исследование локации, серию рутинных действий,

получение нарративно значимой реплики, переключение на коллекционирование. Размерность $|E|$ зависит от проекта; в качестве практического ориентира достаточно 10–20 типов событий, покрывающих основные режимы активности игрока.

Конкретное событие $e \in E$ фиксируется классификатором по данным телеметрии. При наступлении игрового события $e \in E$ вектор пересчитывается по формуле

$$s_i(t+1) = \text{clamp}(s_i(t)\lambda + w_i(e)\mu(e), 0, 100),$$

где

- $\lambda \in (0, 1)$ – коэффициент затухания (рекомендуемое значение $\lambda = 0.92$ за игровую минуту);
- $w_i(e) \in [-1, +1]$ – вес влияния события e на грань i , задается матрицей W размером $|E| \times 8$ при разметке контента;
- $\mu(e) \in [0, 100]$ – интенсивность события, определяемая классификатором по длительности, частоте и контекстному типу;
- $\text{clamp}(x, 0, 100)$ – ограничение значения допустимым диапазоном.

Для каждого параметра s_i определяются три зоны (табл. 3).

Табл. 3. Пороговая классификация зон.

Зона	Диапазон	Интерпретация
Дефицит	$[0, 30)$	параметр не активирован
Норма	$[30, 70]$	устойчивое состояние
Перегрузка	$(70, 100]$	требуется коррекция

Детектор фаз вычисляет доминирующий паттерн P по правилам приоритета:

$$P = \text{argmax}\{\text{score}(p_j)\}, j \in \{\text{перегрузка, застой, нет_развязки, нет_кульминации}\},$$

где $\text{score}(p_j)$ – взвешенная сумма отклонений соответствующих граней от нормы.

Алгоритм (лист. 1) выполняется с периодом Δt (рекомендуемое значение: 60 с игрового времени).

Листинг 1. Главный цикл NSE

```

01 NSE_tick(event_stream, s, t):
02   для каждого e в event_stream за [t-Δt, t]:
03     s ← update_vector(s, e, λ, W)
04   P ← detect_pattern(s)
05   если P = ∅:
06     вернуть NOP           // вмешательство не требуется
07   f ← target_function(P)   // целевая драматургическая функция
08   M ← query_base(f, s)     // выборка модулей по тегам
09   если |M| = 0:
10     активировать visualizer(s)
11     вернуть
12   r ← rank(M, s)           // ранжирование по близости к f
13   если confidence(r[0]) ≥ θ: // θ = 0.65 – порог уверенности
14     активировать recommender(r[0])
15   иначе:
16     активировать generator(f, s)
17   вернуть

```

NSE инициирует выход только при выполнении условия

$$\exists i: s_i \notin [30, 70] \wedge \Delta s_i / \Delta t > \delta,$$

где δ – минимальная скорость изменения, отсекающая шумовые флуктуации (рекомендуемое значение $\delta = 3$ ед./мин). Это предотвращает избыточные вмешательства при устойчивом состоянии.

При первом запуске вектор устанавливается в нейтральное состояние $s(0) = (50, 50, 50, 50, 50, 50, 50, 50)$.

Конкретные значения весов $w_i(e)$ не могут быть определены универсально: они зависят от жанра, темпа и нарративных конвенций конкретного проекта. Методологическим основанием для их определения служат: экспертная настройка связей нарративных объектов с игровыми параметрами, описанная в [18]; принципы итеративной балансировки игровых систем [8]; а также практика экспертного проектирования эмоциональных регистров контента, задокументированная разработчиками *The Legend of Zelda: Breath of the Wild* [20]. Матрица W формируется через инструментарий дизайнера (см. ниже) и уточняется итеративно по данным телеметрии реальных игровых сессий [24].

Все инструменты системы разделены на три категории в зависимости от адресата и момента применения: инструменты для игрока (режим реального времени, runtime), инструменты для дизайнера (этап проектирования) и подсистема адаптивной генерации контента.

5.2. Категория I: инструменты для игрока

Инструменты категории I обращены непосредственно к игроку и работают в режиме реального времени. Их задача – сделать видимым то, что обычно существует лишь на уровне смутного ощущения: собственный нарративный ритм, эмоциональную насыщенность пройденного пути и текущую потребность в том или ином типе контента. Категория включает три подсистемы.

1. *Визуализация нарративной траектории.* По оси *X* показаны фазы (сессии, игровые циклы), по оси *Y* – изменение значений граней нарративного состояния: эмоциональная интенсивность, разнообразие активностей, ощущение завершенности. Интерфейс необязательно технический: он может существовать в форме мягкой визуализации – карты недавних игровых режимов или индикатора насыщенности. Его задача – сделать видимым то, что существует только на уровне смутного ощущения.

2. *Рекомендательная система на основе пейсинга.* В отличие от стандартных рекомендательных систем, оптимизирующих удержание или вероятность клика, здесь объектом оптимизации является качество нарративной волны. Алгоритм рекомендации (см. рис. 7) работает следующим образом: читается текущий вектор нарративного состояния → определяется доминирующий паттерн (перегрузка, застой, отсутствие развязки, дефицит кульминации) → по матрице правил выбирается целевая драматургическая функция → из размеченной базы контента выбирается модуль с совпадающими тегами → рекомендация выдается игроку.

3. *Персональный нарративный профиль.* Динамическая модель предпочтительного пейсинга конкретного игрока: одни склонны к длинным волнам «исследование – вызов – передышка – новый вызов», другие предпочитают плотные драматические кластеры, третьи строят опыт как чередование сюжетных и рутинных практик. Профиль выявляет повторяющиеся паттерны и предоставляет игроку рефлексивную прозрачность, не фиксируя его в одной модели поведения.

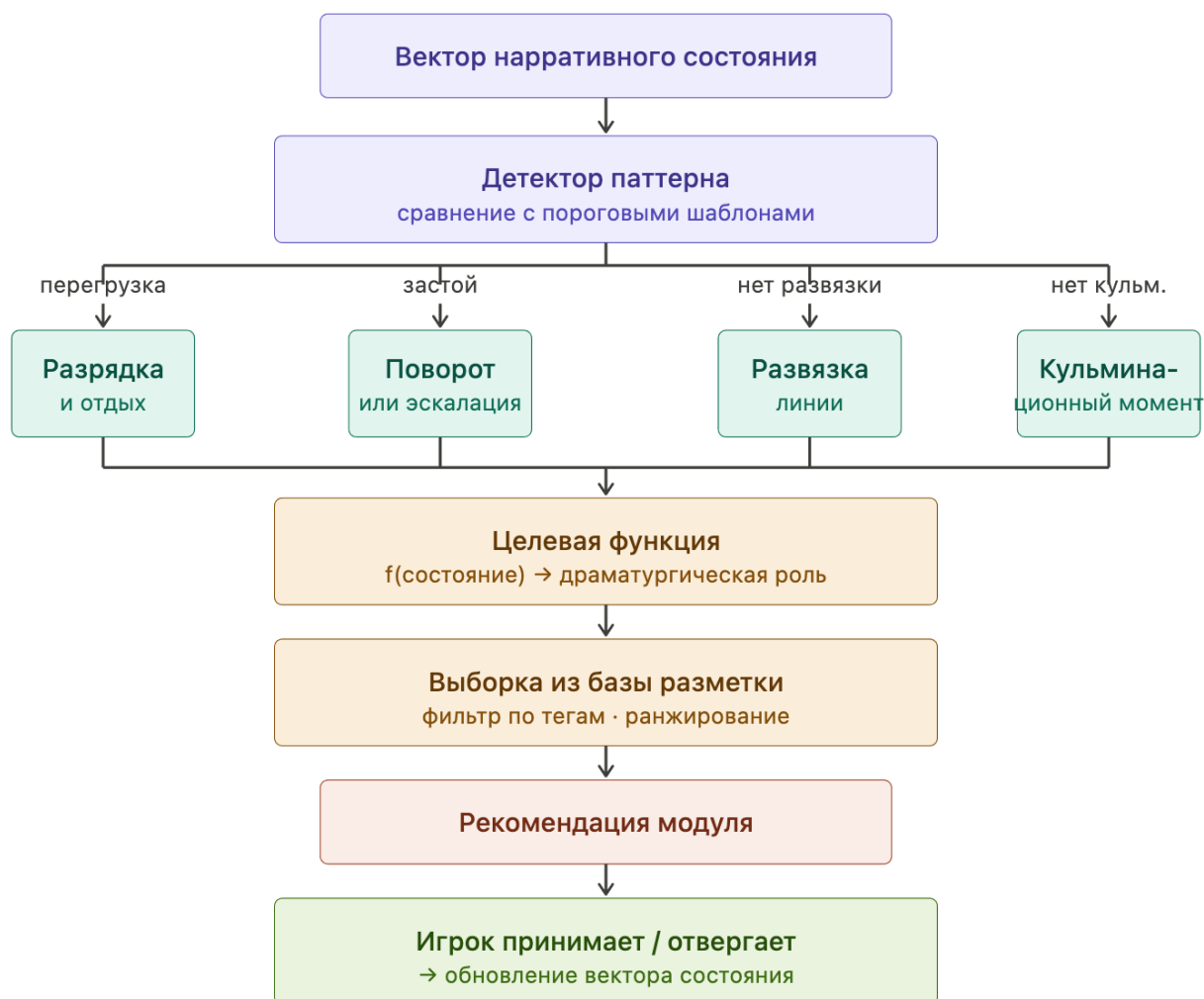


Рис. 7. Алгоритм рекомендации контентного модуля на основе пейсинга: вектор нарративного состояния поступает в детектор диагностических паттернов, который определяет целевую драматургическую функцию; по ней выполняется ранжированная выборка из базы разметки и формируется рекомендация для игрока.

Принципиальным требованием к инструментам категории I является ненавязчивость. Визуализация и рекомендации не должны разрушать иммерсию или создавать когнитивную нагрузку поверх игрового процесса. Возможные решения: мягкая фоновая индикация вместо явных уведомлений, подача рекомендаций в паузах между активностями, опциональность – игрок сам решает, активировать ли слой нарративной рефлексии. Таким образом, инструменты категории I функ-

ционируют как дополнительный слой для тех игроков, которые готовы к осознанному нарративному конструированию, не становясь обязательным элементом интерфейса.

5.3. Категория II: инструменты для дизайнеров

Инструменты категории II работают на этапе проектирования и разметки контента – до того, как игрок запустит игру. Их задача – подготовить данные, необходимые для работы NSE: размеченную базу контентных модулей, настроенные пороги и матрицу весов W . Категория включает три подсистемы: редактор разметки модулей, аналитический дашборд и конфигуратор порогов и тегов.

Редактор разметки модулей. Каждый модуль описан не только по сюжетной теме или механическому типу, но и по драматургическим параметрам: интенсивность (0–100), эмоциональный регистр (трагедия / комедия / эпос / лиризм / хоррор), длительность, когнитивная нагрузка, степень завершенности, тип эмоционального эффекта, совместимость с фазами разрядки или кульминации.

Базовый алгоритм тегирования модуля при внесении в базу (см. рис. 8): на входе – описание квеста и метаданные; оценка по пяти осям (интенсивность, когнитивная нагрузка, эмоциональный регистр, длительность, тип завершенности); пороговая классификация по зонам (кульминационный / медитативный / нейтральный); запись тегов в базу разметки. При наличии LLM-модуля часть осей оценивается автоматически по тексту квеста; остальные задаются дизайнером вручную и корректируются по данным телеметрии.



Рис. 8. Алгоритм классификации контентного модуля при тегировании: модуль оценивается по пяти осям (интенсивность, ритм, риск, когнитивная нагрузка, финальность), пороговая классификация присваивает ему тип (кульминационный/медитативный/нейтральный), после чего сформированный набор тегов записывается в базу разметки и становится доступным рекомендателю.

Аналитический дашборд. Можно выделить три подсистемы, входящие в дашборд.

А. *Система анализа нарративного покрытия.* Поверх размеченной базы строится визуализация, отвечающая на вопросы, достаточно ли вариантов для мягкой развязки после крупных сюжетных пиков; не возникает ли доминирования одного регистра на отдельных этапах прогрессии; равномерно ли распределены спокойные и интенсивные модули; существуют ли провалы, в которых у игрока нет подходящих средств смены ритма. Диагностические паттерны аналогичны перегрузке, застою и избыточной изменчивости из [18].

В. *Аналитика паттернов игровых траекторий.* На агрегированных данных телеметрии строится аналитика: какие последовательности чаще приводят к выпадению из игры; в каких зонах игроки искусственно создают себе развязку; какие типы контента систематически используются в неожиданных драматургических функциях.

С. *Система раннего предупреждения.* На пересечении данных покрытия и телеметрии: автоматическая детекция ситуаций, когда игрок находится в состоянии, требующем коррекции (перегрузка, застой, дефицит кульминации), но подходящих модулей в базе разметки недостаточно или они недоступны на текущем этапе прогрессии. Результат – сигнал дизайнеру о необходимости расширить палитру в конкретной зоне.

Подсистемы дополняют друг друга: (А) анализирует базу разметки, (В) анализирует поведение игроков, (С) выявляет расхождение между ними.

Конфигуратор порогов и тегов. Интерфейс для настройки матрицы весов W , пороговых значений зон и правил активации подсистем NSE применительно к конкретному проекту. Итеративная калибровка параметров по данным телеметрии реальных игровых сессий является стандартной практикой адаптивных игровых систем: в рамках фреймворка Experience-Driven Procedural Content Generation модели игрового опыта уточняются циклически по мере накопления данных о поведении игроков [23]. В предлагаемой архитектуре этот принцип переносится на нарративный слой: конфигуратор обеспечивает дизайнеру доступ к параметрам системы без необходимости вмешательства в программный код.

5.4. Категория III: адаптивная генерация контента

Если у игрока наблюдается потребность не в любом новом материале, а в строго определенной драматургической функции, генерация должна учитывать это состояние. После тяжелой кульминационной последовательности генерируется короткий медитативный эпизод с высокой степенью символической завершенности; после затяжной спокойной фазы – событие, возвращающее чувство риска и ставки; после фрустрирующего кластера – модуль с высоким чувством контроля и ясной наградой.

Большие языковые модели обеспечивают генерацию текстового контента – квестовых диалогов, описаний, реплик NPC – согласно заданным эмоциональной

тональности и нарративной функции [25, 26]. В отличие от простой «персонализации», генерация встраивается в архитектуру нарративной волны, а не только в профиль вкусов пользователя. Использование подобных инструментов с дальнейшим анализом текстов видеоигр [27] позволит изучить нарративные паттерны и понять, как игроки воспринимают различные типы контента, создавая эмпирическую базу для исследования storytelling literacy.

5.5. Ограничения и условия применения

Перенос аппарата [18] в контекст открытых миров требует некоторого уточнения. Исходная система работает с четко формализуемым авторским сюжетом, где дизайнер заранее задает объекты, события, линии и соответствующие им механики. В общем случае нарративная цель игрока неявна, эмоциональные состояния выводятся вероятностно, а один и тот же модуль может выполнять разные функции в зависимости от предшествующей траектории. Поэтому NSE должен сочетать ручную дизайнерскую разметку, телеметрию, модели машинного обучения и LLM-модули интерпретации и генерации [25]. Система [18] выступает как методологическая отправная точка: она показывает, каким образом можно перейти от размышлений о нарративе к формализуемой системе объектов, состояний, порогов, алгоритмов и визуализаций.

Критически важно, чтобы ИТ-инструменты оставались средствами расширения возможностей, а не манипуляции. Граница между поддержкой нарративного конструирования и навязыванием определенного эмоционального опыта должна быть четкой и прозрачной. Реализация рекомендательной подсистемы должна предусматривать явное информирование игрока о логике рекомендаций и возможность их отключения.

6. ПРАКТИЧЕСКИЕ ИМПЛИКАЦИИ ДЛЯ ГЕЙМДИЗАЙНА

Признание игрока нарративным архитектором трансформирует подход к проектированию игр. Для дизайнеров сюжетов это означает переход от линейных последовательностей к модульным эмоциональным палитрам: квесты должны проектироваться как независимые элементы с явной эмоциональной окраской, пригодные для использования в разных контекстах. Из этого вытекает ряд конкретных проектировочных требований.

1. *Метаинформация для игрока.* Игрокам необходимо предоставлять сигналы о характере контента: интенсивность квеста, его эмоциональная тональность, является ли он кульминационным или представляет собой передышку. Реализация возможна через визуальные маркеры (цветовое кодирование), расширенные описания, систему тегов (action, contemplative, emotional, comedic). Открытым вопросом остается баланс между информированием игрока и сохранением эффекта открытия.

2. *Архитектура выбора.* Квестовые структуры должны обеспечивать доступность разных эмоциональных регистров в любой момент прогрессии: параллельные квестовые линии разной тональности, возможность переключаться между интенсивными и медитативными активностями на всем протяжении игры.

3. *Баланс свободы и структуры.* Полная свобода выбора последовательности не всегда служит нарративному опыту: игрок может случайно выстроить последовательность, в которой нет ни одного кульминационного момента, или пройти три тяжелых квеста подряд без разрядки. Дизайнер может задать мягкие ограничения – «мягкие пороги доступности»: отдельные модули становятся доступны только после того, как игрок прошел контент определенной эмоциональной функции. Это сохранит агентность, не разрушив нарративную волну.

Перечисленные требования непосредственно определяют описанную архитектуру инструментов (см. разд. 6): система тегирования обеспечивает метаинформацию, аналитика покрытия проверяет архитектуру выбора, а рекомендательная подсистема реализует мягкую балансировку без нарушения агентности игрока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что открытые миры вызвали фундаментальный сдвиг нарративного авторства: от дизайнера, контролирующего темпоритм, к игроку, самостоятельно выстраивающему последовательность модульных событий. Этот сдвиг требует новой концепции – *storytelling literacy*, включающей три уровня компетенции: распознавание эмоциональной тональности контента, конструирование пейсинга через чередование активностей и нарративное фреймирование опыта.

Предложена формальная модель нарративного состояния игрока, развивающая аппарат [18] в направлении player-centered: вектор из восьми операционных параметров с пороговыми зонами, три группы объектов (контентные линии, грани состояния, нарративная цель), событийно-фазовая структура. На основе этой модели описана архитектура движка нарративного состояния (NSE) – вычислительного модуля, работающего в контуре обратной связи между действиями игрока и игровым контентом.

Система ИТ-инструментов разделена на три категории: инструменты для игрока (визуализация траектории, рекомендации на основе пейсинга, персональный нарративный профиль), инструменты для дизайнера (тегирование контента, анализ нарративного покрытия, аналитика траекторий), адаптивная генерация контента с учетом текущих нарративных потребностей игрока.

Ограничением работы является преимущественно теоретический характер: формальная модель требует эмпирической валидации.

Направления дальнейших исследований определяются тремя ограничениями настоящей работы.

С инженерной точки зрения, приоритетными задачами являются прототипирование NSE и верификация алгоритма на реальных данных телеметрии; калибровка матрицы весов W на игровых проектах различных жанров; оценка вычислительной сложности алгоритма при масштабировании на большие базы контента; интеграция LLM-модуля генерации с пороговым детектором фаз в единый исполняемый контур.

Преимущественно теоретический характер модели также требует эмпирической валидации: измерения корреляции между уровнем storytelling literacy и субъективной удовлетворенностью игровым опытом, проверки универсальности нарративных параметров на культурно разнородных выборках.

Наконец, концепция storytelling literacy как компетенции ставит вопрос о ее обучаемости: насколько осознанное применение драматургических принципов поддается целенаправленному развитию у игроков.

Благодарности

Работа выполнена за счет гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан образовательным организациям высшего образования, научным и иным организациям на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования их научных и научно-педагогических работников к защите докторских диссертаций и выполнению научно-исследовательских работ (Соглашение от 22.12.2025 № 12/2025-ПД-КФУ)

ЛУДОГРАФИЯ

Ubisoft Quebec (2018). Assassin's Creed Odyssey [Action-adventure] [Windows, PlayStation 4/5, Xbox One/Series X/Series S], Ubisoft.

Ubisoft Montreal (2017). Assassin's Creed Origins [Action-adventure] [Windows, PlayStation 4/5, Xbox One/Series X/Series S], Ubisoft.

Ubisoft Montreal (2020). Assassin's Creed Valhalla [Action-adventure] [Windows, PlayStation 4/5, Xbox One/Series X/Series S], Ubisoft.

Quantic Dream (2018). Detroit: Become Human [Interactive cinema] [Windows, PlayStation 4/5], Sony Interactive Entertainment.

Bay 12 Games (2006). Dwarf Fortress [Simulator] [Windows, Linux], Bay 12 Games.

FromSoftware (2022). Elden Ring (2022) [Action-adventure] [Windows, Xbox One/Series X/Series S, PlayStation 4/5, Nintendo Switch 2]

Dontnod Entertainment (2015). Life is Strange [Interactive cinema] [Windows, Xbox 360/One/Series X/Series S, PlayStation 3/4/5, Nintendo Switch, Android, IOS], Sony Interactive Entertainment.

Rockstar Studios (2018). Red Dead Redemption 2 [Action-adventure] [Windows, Xbox 360/One/Series X/Series S, PlayStation 3/4/5, Nintendo Switch / Switch 2, Android, IOS], Rockstar Studios.

Bethesda Game Studios (2011). The Elder Scrolls V: Skyrim [Action-adventure] [Windows, PlayStation 3/4/5, Xbox 360/One/Series X/Series S, Nintendo Switch / Switch 2], Bethesda Softworks.

Naughty Dog (2013). The Last of Us [Action-adventure] [Windows, PlayStation 3/4/5], Sony Computer Entertainment.

Nintendo EPD (2017). The Legend of Zelda: Breath of the Wild [Action-adventure] [Nintendo Wii U/Switch/Switch 2], Nintendo.

Maxis (2000). The Sims [Simulator] [Windows, Mac OS X, PlayStation 2, Xbox, GameCube], Electronic Arts.

CD Projekt RED (2011). The Witcher 2: Assassins of Kings [Action-adventure] [Windows, Xbox 360, Linux, MacOS], CD Projekt.

CD Projekt RED (2015). The Witcher 3: Wild Hunt [Action-adventure] [Windows, Xbox One/Series X/ Series X, PlayStation 4/5, Nintendo Switch, Xbox One,], CD Projekt.

ГЛОССАРИЙ

Адаптивная генерация контента – автоматическое создание игровых текстов, диалогов и событий с учетом текущего нарративного состояния игрока и заданной драматургической функции; реализуется на основе больших языковых моделей.

Ветвящийся нарратив (branching narrative) – тип нелинейного нарративного дизайна, при котором дизайнер заранее создает конечное множество арок; игрок выбирает путь, но темпоритм каждой ветви контролируется дизайнером.

Вектор нарративного состояния – формальное представление текущего игрового опыта в виде числового вектора из восьми нормированных параметров (граней), каждый из которых принимает значения на отрезке [0,100].

Game literacy / игровая грамотность – способность читать игровые системы, понимать механики и эффективно с ними взаимодействовать.

Геймдизайн (game design) – процесс проектирования игровых систем, механик, правил и контента, определяющих игровой опыт.

Грани нарративного состояния – операциональные параметры модели, развивающие понятие «границ» из формальной системы [18] применительно к player-centered перспективе: эмоциональная интенсивность, когнитивная нагрузка, чувство риска, чувство контроля, уровень вовлеченности, ощущение незавершенности, потребность в разрядке, потребность в кульминации.

Движок нарративного состояния (Narrative State Engine, NSE) – вычислительный модуль, работающий в замкнутом контуре обратной связи между телеметрией действий игрока и контентной подсистемой игры.

Драматургическая функция – роль контентного модуля в нарративной волне: кульминация, разрядка, развязка, эскалация и др.

Emergent narrative / эмерджентный нарратив – нарратив, возникающий из взаимодействия игровых систем без авторского замысла, как незапланированное следствие процедурных правил.

Ergodic literature – понятие, введенное Аарсетом [14]: тексты, требующие нетривиальных усилий для прохождения; в игровом контексте – произведения, в которых читатель/игрок активно участвует в конструировании пути через текст.

Замкнутый контур обратной связи (feedback loop) – архитектурный принцип адаптивной системы, при котором выходные данные системы возвращаются на ее вход и влияют на последующее поведение. В контексте NSE: действия игрока → телеметрия → обновление вектора состояния → модификация контента → новые действия игрока → новый цикл.

Катсцена (cutscene) – неинтерактивный видеофрагмент в игре, предназначенный для развития сюжета или представления персонажей.

Контентный модуль – относительно независимая единица игрового контента (квест, активность, локация), характеризующаяся набором драматургических тегов.

Контентные линии – типология активностей игрока в открытом мире: основные и побочные квесты, боевые столкновения, исследование, коллекционирование, социальные взаимодействия, процедурные события.

Кривая Фрейтага – модель драматургической структуры произведения, описывающая последовательную смену фаз: экспозиция → нарастание напряжения → кульминация → спад → развязка [4]. В контексте настоящей статьи используется как эталонная линейная модель, неприменимая к модульным открытым мирам в своем исходном виде.

LLM (Large Language Model, большая языковая модель) – языковая модель на основе трансформерной архитектуры, обученная на больших текстовых корпусах; в контексте настоящей статьи используется для генерации нарративного контента (квестовых диалогов, описаний, реплик NPC) с заданной эмоциональной тональностью и драматургической функцией [25].

Матрица весов W – параметрическая матрица размером $|E| \times 8$, задающая влияние каждого типа игрового события на каждую грань нарративного состояния; настраивается дизайнером и уточняется по данным телеметрии.

Модульный конструктор – тип нарративного дизайна открытых миров, при котором контент представлен как палитра независимых модулей с разной эмоциональной тональностью, а последовательность прохождения определяется игроком самостоятельно.

Нарративная арка – драматургическая кривая эмоционального напряжения: нарастание, кульминация, развязка.

Нарративное покрытие – характеристика базы контентных модулей, отражающая равномерность представленности разных драматургических функций и эмоциональных регистров на всем протяжении игровой прогрессии.

Нарративное фреймирование – наложение нарративного смысла на механические действия: определение «главной истории» и «побочных эпизодов» собственной игровой траектории, придание значения отдельным эпизодам через нарративную линзу, конструирование момента завершения. Третий уровень storytelling literacy.

Нарративный профиль игрока – динамическая модель предпочтительного пейсинга конкретного игрока, выявляемая на основе повторяющихся паттернов его игровой траектории.

NPC (non-player character) – неигровой персонаж, управляемый игровой системой.

Открытый мир (open world) – тип игрового пространства, предоставляющий игроку свободу исследования и выбора последовательности прохождения контента без жестко заданной линейной структуры.

Пейсинг (pacing) – темп и ритм подачи событий и контента: характер чередования интенсивных и медитативных эпизодов, управляющий эмоциональной динамикой игрового опыта.

Personality-based narrative adaptation – подход к нарративному дизайну, при котором содержание и структура контента адаптируются к личностным чертам игрока (например, по модели Big Five); отличается от storytelling literacy тем, что адаптация выполняется системой, а не самим игроком осознанно [19].

Player agency / агентность игрока – способность игрока совершать осмысленный выбор и оказывать влияние на игровой мир и развитие событий.

Player-driven narrative – нарратив, конструируемый самим игроком через выбор последовательности модульного контента.

Пороговый детектор фаз – компонент NSE, вычисляющий доминирующий диагностический паттерн на основе отклонений граней нарративного состояния от нормы.

Procedural literacy / процедурная грамотность – способность понимать и создавать системы на основе правил и алгоритмов; введена как аналог читательской грамотности для интерактивных медиа.

Spatial literacy / пространственная грамотность – способность читать и интерпретировать нарративные значения, закодированные в игровом пространстве: архитектуре локаций, расположении объектов, визуальных подсказках окружения.

Storytelling literacy – компетенция игрока, включающая способность распознавать эмоциональную тональность контента, осознанно конструировать пейзаж через чередование активностей и нарративно фреймировать собственную игровую траекторию.

Сторителлер (storyteller) – субъект, создающий и структурирующий повествование, определяя его композицию и эмоциональную динамику.

Темпоритм – в нарративном дизайне: соотношение скорости и ритма смены эмоциональных состояний на протяжении игрового опыта.

Temporal narrative literacy / темпоральная нарративная грамотность – способность выстраивать последовательность событий во времени, конструируя эмоциональную динамику нарратива; в контексте настоящей статьи – компонент storytelling literacy, отличающий ее от spatial literacy.

Телеметрия действий – поток данных о поведении игрока, регистрируемый игровой системой в реальном времени: типы действий, их длительность, частота и контекст.

Тегирование контента – процедура разметки контентного модуля набором драматургических атрибутов, обеспечивающих его последующую выборку рекомендательной подсистемой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Field S.* Screenplay: The Foundations of Screenwriting. New York: Bantam Dell, 1979. 320 p.
2. *Campbell J.* The Hero with a Thousand Faces. 3rd ed. Novato: New World Library, 2008. 418 p.
3. *Vogler C.* The Writer's Journey: Mythic Structure for Writers. 3rd ed. Studio City: Michael Wiese Productions, 2007. 300 p.
4. *Freytag G.* Freytag's Technique of the Drama. Chicago: S. C. Griggs & Company, 1895. 368 p.
5. *Сахибгареева Г.Ф., Кугуракова В.В.* Прототипирование вариативности сюжета компьютерных игр // Труды XXIII Всерос. науч. конф. «Научный сервис в сети Интернет». М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2021. С. 347–360.
6. *Сахибгареева Г.Ф., Кугуракова В.В.* Концепт инструмента автоматического создания сценарного прототипа компьютерной игры // Электронные библиотеки. 2018. Т. 21. № 3-4. С. 235–249.
7. *Fernández-Vara C.* Introduction to Game Analysis. 2nd ed. New York: Routledge, 2019. 336 p.
8. *Salen K., Zimmerman E.* Rules of Play: Game Design Fundamentals. Cambridge: MIT Press, 2003. 688 p.
9. *Murray J.* Hamlet on the Holodeck: The Future of Narrative in Cyberspace. New York: Free Press, 1997. 324 p.
10. *Sicart M.* Play Matters. Cambridge: MIT Press, 2014. 176 p.
11. *Keogh B.* A Play of Bodies: How We Perceive Videogames. Cambridge: MIT Press, 2018. 208 p.
12. *Bogost I.* Persuasive Games: The Expressive Power of Videogames. Cambridge: MIT Press, 2007. 464 p.
13. *Jenkins H.* Game Design as Narrative Architecture // First Person: New Media as Story, Performance, and Game. Cambridge: MIT Press, 2004. P. 118–130.
14. *Aarseth E.* Cybertext: Perspectives on Ergodic Literature. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1997. 203 P.

15. Кугуракова В.В. Формальный подход к пространственно-временному моделированию игровых систем // Ученые записки Казанского университета. Серия: Физико-математические науки. 2024. Т. 166. № 4. С. 532–554.
16. Gee J.P. What Video Games Have to Teach Us About Learning and Literacy. New York: Palgrave Macmillan, 2003. 256 p.
17. Meakin E. Video game structural layers for narrative design and articulation // Digital Creativity. 2024. Vol. 35, No. 4. P. 321–340.
18. Липатов В.В. Автоматическая генерация игровых механик в соответствии с нарративом: специальность 09.04.04 «Программная инженерия»: магистерская диссертация / науч. рук. В.В. Кугуракова; Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2019. 78 с.
19. Auer C., Lankes M. Enhancing Player Satisfaction Through Personality-Based Narrative Adaptation in Digital Games // Proceedings of the 20th International Conference on the Foundations of Digital Games. 2025. P. 1–11.
20. Dohita T., Fujibayashi H., Satoru T. Breaking Conventions with The Legend of Zelda: Breath of the Wild // GDC. 2017.
URL: <https://www.gdcvault.com/play/1024562>.
21. Mateas M. Procedural Literacy: Educating the New Media Practitioner // On the Horizon. 2005. Vol. 13, No. 2. P. 101–111.
22. Graesser A.C., Singer M., Trabasso T. Constructing Inferences During Narrative Text Comprehension // Psychological Review. 1994. Vol. 101., No. 3. P. 371–395.
23. Yannakakis G.N., Togelius J. Experience-Driven Procedural Content Generation // IEEE Transactions on Affective Computing. 2011. Vol. 2, No. 3. P. 147–161.
24. Lopes P., Fachada N., Fonseca M. Closing the loop: A systematic review of experience-driven game adaptation // arXiv preprint arXiv:2505.01351. 2025. P. 1–16.
25. Трофимчук В.Т., Кугуракова В.В. Разработка адаптивной системы генерации игровых квестов и диалогов на основе больших языковых моделей // Электронные библиотеки. 2025. Т. 28. № 4. С. 953–993.
26. Paul C.A. Optimizing Play: How Theocracy Changes Gameplay and Design // Games and Culture. 2011. Vol. 6., No. 5. P. 423–438.
27. Nurlygaianov N.R., Kugurakova V.V. A New Approach to Creating a Corpus of Video Game Texts // Automatic Documentation and Mathematical Linguistics. 2024. Vol. 58 (Suppl. 4). P. 234–240.

IT TOOLS FOR PLAYER-DRIVEN NARRATIVE IN OPEN-WORLD

V. V. Kugurakova¹ [0000-0002-1552-4910], M. V. Kochakova² [0009-0004-2760-7846],

V. V. Lipatov³ [0009-0006-4070-0310]

^{1, 3}Kazan (Volga region) Federal University, Kazan, Russia

²Institute of Business and Design, Moscow, Russia

¹vlada.kugurakova@gmail.com, ²narratorika@gmail.com, ³lipatovvv95@gmail.com

Abstract

In open-world games, classical tools of dramatic analysis – the three-act structure, Freytag's pyramid, the hero's journey – fail to describe the actual gameplay experience: players gain freedom to choose the traversal order of modular content, making authorial control over pacing impossible. This paper introduces the concept of *storytelling literacy* – a player competency encompassing recognition of the emotional register of content, conscious pacing construction through activity sequencing, and narrative framing of one's own gameplay trajectory. Based on a formal model of player narrative state – an adaptation of the story-object/phase/facet/threshold-state formalism – we propose an architecture for an IT system supporting player-driven narrative. The system comprises a Narrative State Engine (feedback loop between action telemetry and the content subsystem), trajectory visualization tools for players, narrative coverage analysis tools for designers, and an adaptive content generation module based on large language models.

Keywords: *video games, open worlds, narrative design, storytelling literacy, pacing, modular narrative, player agency, procedural content generation, narrative state engine, game literacy.*

Acknowledgments

This work/publication was funded by a grant from the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan provided to higher education institutions, scientific and other organizations to support human resource development plans in terms of encouraging their research and academic staff to defend doctoral dissertations and conduct research activities (Agreement No. 12/2025-PD-KFU dated December 22, 2025)

REFERENCES

1. *Field S.* Screenplay: The Foundations of Screenwriting. New York: Bantam Dell, 1979. 320 p.
2. *Campbell J.* The Hero with a Thousand Faces. 3rd ed. Novato: New World Library, 2008. 418 p.
3. *Vogler C.* The Writer's Journey: Mythic Structure for Writers. 3rd ed. Studio City: Michael Wiese Productions, 2007. 300 p.
4. *Freytag G.* Freytag's Technique of the Drama. Chicago: S. C. Griggs & Company, 1895. 368 p.
5. *Sahibgareeva G.F., Kugurakova V.V.* Prototyping the variability of computer games plots // Proceedings of the 23rd Conference on Scientific Services & Internet (SSI 2021). 2021. P. 347–360.
6. *Sahibgareeva G.F., Kugurakova V.V.* The Concept of Automatic Creation Tool for Computer Game Scenario Prototype // Russian Digital Libraries Journal, 2018. Vol. 21. No. 3-4. P. 235–249.
7. *Fernández-Vara C.* Introduction to Game Analysis. 2nd ed. New York: Routledge, 2019. 336 p.
8. *Salen K., Zimmerman E.* Rules of Play: Game Design Fundamentals. Cambridge: MIT Press, 2003. 688 p.
9. *Murray J.* Hamlet on the Holodeck: The Future of Narrative in Cyberspace. New York: Free Press, 1997. 324 p.
10. *Sicart M.* Play Matters. Cambridge: MIT Press, 2014. 176 p.
11. *Keogh B.* A Play of Bodies: How We Perceive Videogames. Cambridge: MIT Press, 2018. 208 p.
12. *Bogost I.* Persuasive Games: The Expressive Power of Videogames. Cambridge: MIT Press, 2007. 464 p.
13. *Jenkins H.* Game Design as Narrative Architecture // First Person: New Media as Story, Performance, and Game. Cambridge: MIT Press, 2004. P. 118–130.
14. *Aarseth E.* Cybertext: Perspectives on Ergodic Literature. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1997. 203 P.
15. *Kugurakova V.V.* A formal approach to spatio-temporal modeling of game systems // Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki. 2024. Vol. 166, No. 4. P. 532–554.

16. *Gee J.P.* What Video Games Have to Teach Us About Learning and Literacy. New York: Palgrave Macmillan, 2003. 256 p.
17. *Meakin E.* Video game structural layers for narrative design and articulation // Digital Creativity. 2024. Vol. 35, No. 4. P. 321–340.
18. *Lipatov V.V.* Avtomaticheskaya generatsiya igrovyykh mekhanik v sootvetstvii s narrativom: 09.04.04 «Programmnaya inzheneriya»: master degree thesis / scientific supervisor V.V. Kugurakova; Kazan Federal University, 2019. 78 p.
19. *Auer C., Lankes M.* Enhancing Player Satisfaction Through Personality-Based Narrative Adaptation in Digital Games // Proceedings of the 20th International Conference on the Foundations of Digital Games. 2025. P. 1–11.
20. *Dohata T., Fujibayashi H., Satoru T.* Breaking Conventions with The Legend of Zelda: Breath of the Wild // GDC. 2017.
URL: <https://www.gdcvault.com/play/1024562>.
21. *Mateas M.* Procedural Literacy: Educating the New Media Practitioner // On the Horizon. 2005. Vol. 13, No. 2. P. 101–111.
22. *Graesser A.C., Singer M., Trabasso T.* Constructing Inferences During Narrative Text Comprehension // Psychological Review. 1994. Vol. 101., No. 3. P. 371–395.
23. *Yannakakis G.N., Togelius J.* Experience-Driven Procedural Content Generation // IEEE Transactions on Affective Computing. 2011. Vol. 2, No. 3. P. 147–161.
24. *Lopes P., Fachada N., Fonseca M.* Closing the loop: A systematic review of experience-driven game adaptation // arXiv preprint arXiv:2505.01351. 2025. P. 1–16.
25. *Trofimchuk V.T., Kugurakova V.V.* Development of an Adaptive System for Generating Game Quests and Dialogues Based on Large Language Models // Russian Digital Libraries Journal. 2025. Vol. 28, No. 4. P. 953–959.
26. *Paul C.A.* Optimizing Play: How Theorcraft Changes Gameplay and Design // Games and Culture. 2011. Vol. 6., No. 5. P. 423–438.
27. *Nurlygaianov N.R., Kugurakova V.V.* A New Approach to Creating a Corpus of Video Game Texts // Automatic Documentation and Mathematical Linguistics. 2024. Vol. 58 (Suppl. 4). P. 234–240.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



КУГУРАКОВА Влада Владимировна – кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой индустрии разработки видеоигр Института информационных технологий и интеллектуальных систем (ИТИС) Казанского федерального университета (КФУ). Область научных интересов – формальные методы верификации видеоигр.

Vlada Vladimirovna KUGURAKOVA – PhD, Head of the Department of Video Game Development Industry (GD Chair) at the Institute of Information Technology and Intelligent Systems (ITIS), Kazan Federal University (KFU). Research interests include is the formal methods of video game verification.

email: vlada.kugurakova@gmail.com

ORCID: 0000-0002-1552-4910



КОЧАКОВА Мария Валерьевна – генеральный директор онлайн-школы «Нарраторика», игровой сценарист, нарративный дизайнер, инди-разработчик, преподаватель нарративного дизайна в Институте бизнеса и дизайна B&D.

Maria Valerievna KOCHAKOVA, CEO “Narratorika”, game writer, narrative designer, indie-developer, lecturer in Narrative Design at the Institute of Business and Design (B&D).

email: narratorika@gmail.com

ORCID: 0009-0004-2760-7846



ЛИПАТОВ Владислав Валерьевич – выпускник магистратуры Института информационных технологий и интеллектуальных систем Казанского федерального университета.

Vladislav Valerievich LIPATOV – Master's graduate degree graduate of the Institute of Information Technology and Intelligent Systems, Kazan Federal University.

email: lipatovvv95@gmail.com

ORCID: 0009-0006-4070-0310

Материал поступил в редакцию 24 апреля 2026 года

ВИЗУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИГРОВЫХ МЕХАНИК В ИНСТРУМЕНТЕ TULA: ТЕМПОРАЛЬНЫЕ И ВЕРОЯТНОСТНЫЕ АСПЕКТЫ

В. В. Кугуракова¹ [0000-0002-1552-4910], В. Т. Трофимчук² [0009-0001-9106-9614]

^{1, 2}Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

¹vlada.kugurakova@gmail.com, ²vselord.beta@gmail.com

Аннотация

Рассмотрена проблема визуального представления темпоральных и вероятностных элементов в инструментах формального моделирования игровых механик. На основе анализа существующих систем визуального моделирования – Machinations, сетей Петри, диаграмм состояний UML и UPPAAL – выявлены их ключевые ограничения при описании сложных игровых сценариев. Предложен подход к визуализации темпоральных операторов и вероятностных конструкций в инструменте Tula, разработанном авторами. Описан набор визуальных примитивов, обеспечивающих двунаправленное соответствие между визуальным представлением и формальной спецификацией на языке геймплея. Приведены примеры визуального моделирования типовых игровых сценариев с элементами временных задержек, условных вероятностей и многопользовательских взаимодействий. Показана возможность автоматической трансформации визуальных моделей в формальные спецификации, пригодные для верификации средствами PRISM и UPPAAL. Проведён сравнительный анализ выразительных возможностей Tula и систем-предшественников, показавший, что Tula является единственной из рассмотренных систем, одновременно обеспечивающей формальную верифицируемую семантику, встроенную поддержку темпоральных операторов (X, G, F, U) и произвольных вероятностных распределений, а также визуальную нотацию, организованную вокруг ресурсных потоков и игровых событий. Предложенный в Tula принцип двухуровневой спецификации с двунаправленной трансформацией замыкает цикл «дизайн → формализация → верификация → корректировка», снижая порог входа в формальные методы для практиков без потери верификационной полноты. Это позволяет рассматривать

Tula как промежуточный слой между итеративным геймдизайном и промышленными верификаторами.

Ключевые слова: визуальное моделирование, игровые механики, темпоральные операторы, вероятностные модели, формальная верификация, Tula, Machinations, сему Петри.

ВВЕДЕНИЕ

Формальное описание игровых механик сопряжено с принципиальным противоречием между сложностью математического аппарата и доступностью геймдизайна для практиков. Языки темпоральной логики и вероятностные модели предоставляют необходимую строгость, однако требуют значительной математической подготовки. Визуальные нотации, напротив, снижают порог вхождения, но исторически страдали ограниченной формальной семантикой [1, 2].

В работе [3] нами был предложен язык спецификации геймплея, интегрирующий темпоральные операторы (X, G, F, U) и вероятностные конструкции в единую формальную систему. Настоящая статья посвящена визуальному уровню той же системы: как темпоральные и вероятностные элементы спецификации представляются визуально в инструменте Tula [4] и как это соотносится с подходами систем-предшественников.

Актуальность настоящей работы обусловлена тем, что разрыв между визуальным моделированием и формальной верификацией остается ключевым препятствием на пути к промышленному применению методов верификации в разработке видеоигр. Устранение этого разрыва требует специализированного визуального языка с точно определенной семантикой.

Целью работы было:

- 1) систематизировать подходы к визуализации темпоральных и вероятностных аспектов в существующих инструментах;
- 2) описать соответствующие визуальные примитивы в Tula;
- 3) продемонстрировать на примерах полный цикл от визуальной модели к формальной спецификации и верификации.

ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ СИСТЕМ ВИЗУАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Machinations

Система Machinations, предложенная Дормансом [5], является наиболее широко используемым инструментом визуального моделирования игровых механик. Визуальный язык построен на шести типах узлов: Source (источник ресурсов), Pool (хранилище), Drain (потребитель), Converter (преобразователь), Gate (условный маршрутизатор) и Trader (обменник). Ресурсные потоки заданы направленными ребрами с весовыми коэффициентами [5, 6].

С точки зрения временного представления Machinations поддерживает дискретный игровой счетчик («time mode»: пошаговый или непрерывный) и узлы с задержкой активации (delayed). Вероятностные аспекты ограничены случайными воротами (random gates) с равномерным распределением. Принципиальным ограничением системы является отсутствие формальной семантики: Machinations-диаграммы не допускают автоматической верификации и не отличаются, например, оператор G (всегда) от F (когда-нибудь) [7].

Сети Петри и их расширения

Сети Петри предоставляют математически точную нотацию для моделирования параллельных и асинхронных процессов [8]. В контексте игровых механик они применялись для описания конечных автоматов игровых состояний, систем инвентаря и последовательностей событий. Темпоральные расширения – временные сети Петри (Time Petri Nets) и стохастические сети Петри – добавляют соответственно временные интервалы на переходах и экспоненциальные распределения задержек [9].

Несмотря на строгость математической основы, стандартные сети Петри обладают существенными ограничениями для геймдизайна: отсутствие иерархии, сложность представления ресурсных потоков с численными значениями, а также низкая интуитивность нотации для не подготовленных математически специалистов [10]. Расширение Coloured Petri Nets частично решает первую и вторую проблемы, однако ценой еще большего усложнения визуального языка [11].

UML-диаграммы состояний

Диаграммы состояний UML (State Machine Diagrams) широко применяются для моделирования логики персонажей и игровых объектов [12]. Они поддерживают иерархические (вложенные) состояния, историю состояний и параллельные регионы. Для игрового искусственного интеллекта (ИИ) диаграммы состояний стали де-факто стандартом благодаря прямой поддержке в движках Unity и Unreal Engine.

Темпоральные аспекты в UML-диаграммах выражаются через временные события («after(t)» на переходе) и диаграммы времени (Timing Diagrams). Однако вероятностные переходы в стандарте UML не предусмотрены: их реализация требует нестандартных расширений или перехода к вероятностным автоматам [13]. Верификация UML-моделей возможна через конвертацию в формат UPPAAL¹ [14] или PRISM² [15], но инструментальная поддержка этого пути остается ограниченной.

Среда моделирования UPPAAL

UPPAAL [14] – верификатор временных автоматов (timed automata) – предоставляет собственный визуальный редактор сетей автоматов. Каждый автомат описывается графом состояний с инвариантами на состояниях, а также охранными условиями (guards) и сбросами часов (resets) на переходах. Язык запросов TCTL³ [16] позволяет задавать темпоральные свойства: достижимость (EF), безопасность (AG), жизнеспособность (AF).

Для игровых применений UPPAAL использовался в задачах верификации балансировки [3] и анализа инвариантов игрового мира. Ограничением UPPAAL как проектировочного инструмента является его ориентация на верификацию, а не на синтез: модели создаются «снизу вверх» от формальных конструкций, что затрудняет применение в итеративном геймдизайне.

¹ UPPAAL – верификатор систем реального времени на основе сетей временных автоматов (Упсальский университет / Университет Ольборга).

² PRISM (Probabilistic Symbolic Model Checker) – верификатор вероятностных систем, поддерживающий DTMC, MDP и логики PCTL/CSL (Университет Бирмингема).

³ TCTL (Timed Computation Tree Logic) – расширение логики ветвящегося времени CTL, добавляющее количественные временные ограничения на операторы достижимости и безопасности вида $EF \leq t$, $AG \geq t$. Используется как язык запросов в UPPAAL [14].

Сравнительный анализ

Сводная информация о рассмотренных системах представлена в табл. 1. Установлено принципиальное противоречие между двумя группами систем. Machinations и частично UML-диаграммы состояний оптимизированы для практики геймдизайна: их визуальные нотации интуитивны, нотации ориентированы на ресурсные потоки и поведение игровых объектов. Однако обе системы жертвуют формальной строгостью: в Machinations отсутствует верифицируемая семантика, а UML предоставляет ее лишь через нестандартные расширения. Сети Петри и UPPAAL, напротив, обладают строгой математической основой и допускают автоматическую верификацию, однако их визуальные языки не адаптированы к специфике игровых задач: ресурсные потоки, балансировка и итеративное прототипирование находятся за пределами их проектной области.

Табл. 1. Характеристики систем визуального моделирования игровых механик.

Критерий	Machinations	Сети Петри	UML SM	UPPAAL	Tula
Формальная семантика	Нет	Да	Частично	Да	Да
Временные операторы	Ограничено	Расширения	after(t)	Полные	Полные
Вероятностные элементы	Случайные ворота	Стохастические расширения	Нет	Нет*	Встроены
Ресурсные потоки	Да	Ограничено	Нет	Нет	Да
Автоверификация	Нет	Да	Через конвертацию	Да	Да
Ориентация на геймдизайн	Да	Нет	Частично	Нет	Да

*вероятностная верификация выносится в PRISM (либо UPPAAL-SMC).

Особого внимания заслуживает различие в подходах к темпоральным элементам. Machinations использует неявную темпоральность: время моделируется счетчиком итераций симуляции без прямого соответствия операторам формальной логики. Временные сети Петри и UPPAAL реализуют непрерывное или дискретное время с точной семантикой, однако их конструкции (инварианты состояний, часовые переменные) не имеют интуитивных аналогов в лексиконе

геймдизайна. UML-диаграммы занимают промежуточную позицию: конструкция *after(t)* понятна практикам, но ее выразительной мощности недостаточно для описания свойств вида «с вероятностью не менее 0.9 игра завершается за 20 ходов».

Вероятностное измерение обнаруживает схожую картину. Случайные ворота *Machinations* обеспечивают базовое моделирование недетерминизма, однако ограничены равномерным распределением и не допускают задания условных вероятностей.

Стохастические сети Петри поддерживают экспоненциальные распределения, что адекватно для телекоммуникационных задач, но неестественно для игровой механики, оперирующей дискретными событиями с произвольными вероятностями. PRISM как верификатор марковских цепей обладает наибольшей выразительностью в вероятностном домене, однако является инструментом верификации, а не проектирования.

Наглядное сравнение нотаций на примере одной механики представлено на рис. 1 и 2. Нотация *Machinations* (рис. 1) обеспечивает интуитивное визуальное прототипирование игровых экономик. Вместе с тем в базовой версии инструмента отсутствуют темпоральные метки; вероятности в *Random Gate* фиксированы и не зависят от игрового состояния; формальная семантика не определена, что исключает верификацию без привлечения расширений типа *Micro-Machinations* [17].

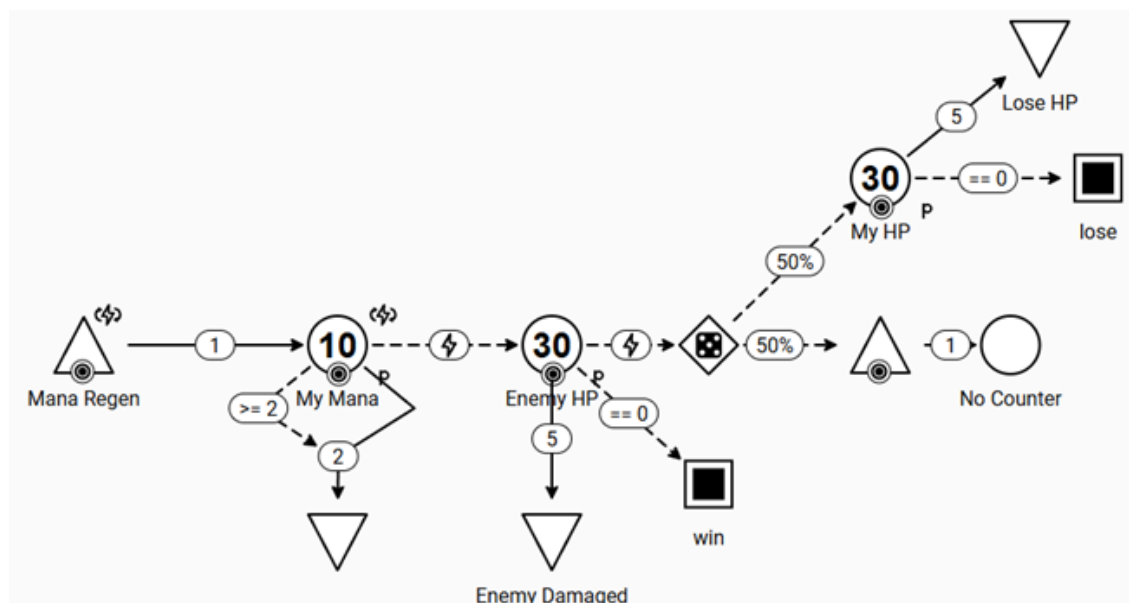


Рис. 1. Диаграмма *Machinations* для боевой механики карточной игры.

В отличие от Machinations, нотация временных сетей Петри (рис. 2) допускает строгую формальную трактовку, однако применительно к задачам геймдизайна выявляется иной набор ограничений: ресурсные потоки выражаются кратностью дуг без числовых значений; стохастические переходы задаются интенсивностью λ (экспоненциальное распределение в рамках GSPN), что не позволяет напрямую задать дискретные вероятности вида $p = 0.3/0.7$.

Таким образом, ни одна из рассмотренных систем не обеспечивает одновременно: (1) формальной семантики, допускающей верификацию; (2) поддержки темпоральных и произвольных вероятностных конструкций; (3) визуального языка, ориентированного на понятия игровых механик.

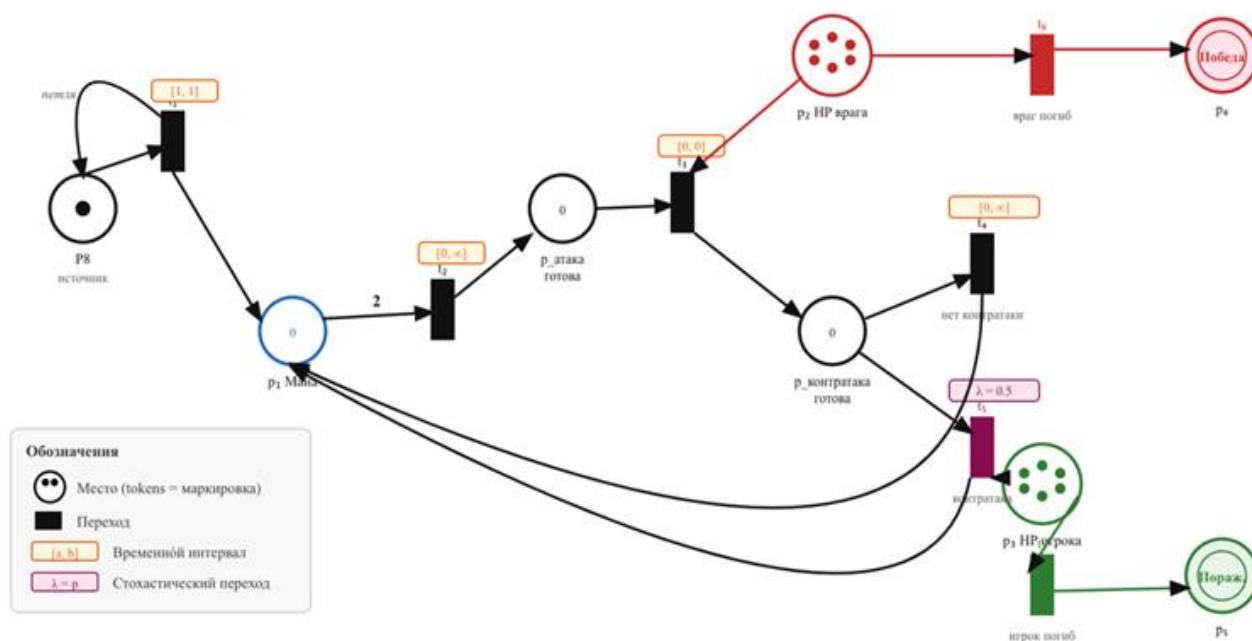


Рис. 2. Временная сеть Петри для той же механики.

Именно эта совокупность требований определила архитектурные решения инструмента Tula, описанные в следующем разделе.

ВИЗУАЛЬНЫЙ ЯЗЫК ИНСТРУМЕНТА TULA

Архитектура двухуровневой спецификации

Ключевым архитектурным решением Tula является принцип двухуровневой спецификации: высокоуровневая (формальная) и низкоуровневая (визуаль-

ная) спецификации существуют как два согласованных представления одной модели. Высокоуровневая спецификация на языке геймплея содержит полное формальное описание, включая темпоральные и вероятностные операторы, предназначенное для верификации [18], низкоуровневая визуальная спецификация – упрощенное представление для итеративного прототипирования и балансировки [4].

Соответствие между уровнями задано набором правил трансформации, позволяющих как порождать формальную спецификацию из визуальной модели, так и восстанавливать визуальное представление по существующей спецификации. Это обеспечивает непротиворечивость обоих уровней в процессе совместного редактирования.

Базовые визуальные примитивы

Визуальный язык Tula включает восемь базовых типов узлов (см. рис. 3), образующих минимально достаточный набор для описания игровых механик.

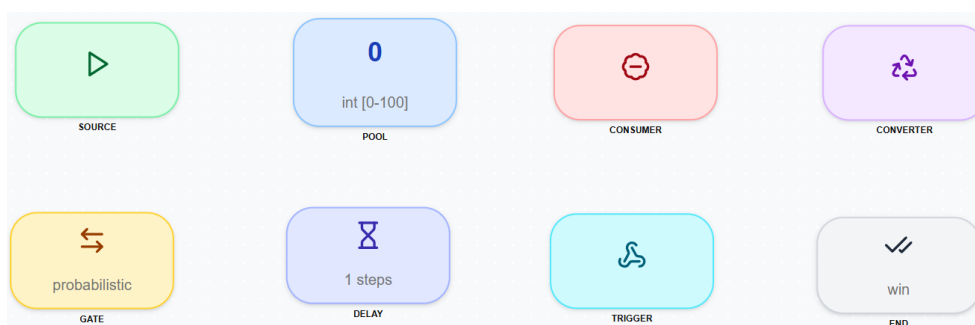


Рис. 3. Визуальные примитивы Tula.

Узел *Source* (Источник) порождает ресурсы по заданному правилу активации. В отличие от *Machinations*, Tula позволяет задавать произвольное распределение интенсивности генерации, включая непрерывные распределения (нормальное, показательное) и темпорально обусловленные правила: «генерировать каждые t ходов, начиная с хода n ».

Узел *Pool* (Хранилище) хранит ресурсы с заданными ограничениями емкости. Каждый *Pool* несет тип ресурса, текущее значение и диапазон допустимых значений $[min, max]$, что соответствует формальному определению состояния $s \in S$ с ограничением $s.value \in [s.min, s.max]$.

Узел *Consumer* (Потребитель) необратимо поглощает ресурсы. В контексте игровой механики он соответствует «стоку», например расходу маны при применении заклинания или потере здоровья при получении урона.

Узел *Converter* (Конвертер) преобразует один тип ресурса в другой по заданному коэффициенту конвертации. Конвертер поддерживает как детерминированные, так и вероятностные коэффициенты: например, «с вероятностью 0.3 конвертировать 2 единицы атаки в 3 единицы урона».

Узел *Gate* (Условный маршрутизатор) направляет ресурсный поток по одному из нескольких исходящих ребер в зависимости от булева или вероятностного условий. Узел помечается как *probabilistic* (вероятностный), если нужно направление ресурсов по нескольким рёбрам согласно указанной вероятности, или *deterministic* (булев), когда выбирается один путь из многих. Именно через *Gate* визуализируются вероятностные развилки и условные переходы формальной спецификации.

Узел *Delay* (Задержка) является одним из двух специализированных примитивов для темпоральных конструкций. Он буферизует проходящий ресурсный поток на заданное количество временных шагов δ , после чего передает его дальше. Формально это соответствует применению оператора $X \wedge \delta$ (следующий на δ шагов) к соответствующему событию.

Узлы *Trigger* и *End* обеспечивают соответственно принудительную активацию связанных узлов при наступлении события и фиксацию конечных состояний игры (победу, поражение, ничью).

Типы ребер и их семантика

Наряду с узлами семантически нагруженными являются и типы соединительных ребер. Tula поддерживает четыре типа ребер: прямое ресурсное ребро (непрерывный поток ресурсов), триггерное ребро (передача управляющего сигнала без ресурса), ребро-модификатор (изменение параметра целевого узла) и ребро обратной связи (установление зависимости интенсивности потока от состояния целевого узла). Последний тип особенно важен для моделирования динамики балансировки [19] и не имеет прямого аналога в базовом *Machinations*.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТЕМПОРАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Оператор «Следующий» (X)

Темпоральный оператор $X\varphi$ («в следующий момент времени φ ») визуализируется в Tula через узел *Delay* с параметром $\delta = 1$ (см. рис. 4).

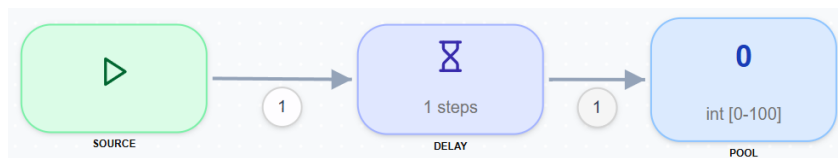


Рис. 4. Три узла этого примера отражают передачу (СЛЕДУЮЩИЙ МОМЕНТ) потока ресурсов из источника в пул с использованием временного буфера.

Если формальная спецификация содержит правило вида (см. лист. 1), то в визуальной модели это представляется как ребро от *Source* «Атака» через узел *Delay(1)* к *Pool* «Здоровье противника».

Листинг 1. Пример события, наступающего в будущем.

```
Event AttackPlayer {
    Effect: X(Target.Health -= Self.Attack)
}
```

Наглядность такого представления обусловлена явной «физической» интерпретацией задержки как буфера ресурса во времени.

Оператор «Всегда» (G) и инварианты

Оператор $G\varphi$ («всегда выполняется φ ») соответствует инварианту системы. В визуальной нотации Tula инварианты представляются как постоянно активные ограничения на значения *Pool*-узлов (через параметры *min/max*) или через петли обратной связи, поддерживающие значение ресурса в допустимом диапазоне (см. рис. 5). Двойным нажатием открываются опции ноды *Pool*. В них можно указать *min* и *max* значения, что соответствует $G(>Min)$ и $G(\leq Max)$.



Рис. 5. Пул со встроенными инвариантами (то есть то, что выполняется ВСЕГДА).

Например, инвариант «здоровье игрока всегда неотрицательно» ($G(\text{Player.Health} \geq 0)$) задается ограничением $\text{Pool.min} = 0$ на соответствующем узле.

Оператор «Когда-нибудь» (F) и цели

Оператор $F\varphi$ («когда-нибудь φ ») описывает достижимые состояния и игровые цели. В Tula он визуализируется через узел *End*, связанный условным ребром с проверяемым *Pool*-узлом (см. рис. 6). Когда значение в *Pool* достигает заданного порога, активируется *End*, фиксируя наступление целевого состояния. Таким образом, условие победы «игрок набирает 1000 очков» ($F(\text{Score} \geq 1000)$) непосредственно кодируется топологией схемы.

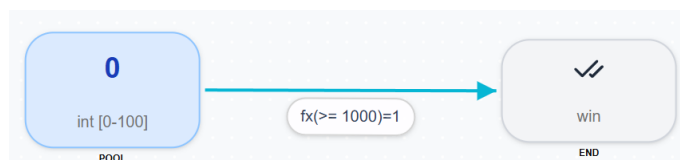


Рис. 6. Пример реализации функции КОГДА-НИБУДЬ.

Оператор «До» (U) и ограниченные свойства

Оператор $\varphi U \psi$ (« φ выполняется до тех пор, пока не выполнится ψ ») является наиболее сложным для визуального представления. В Tula он реализуется с помощью двух узлов – *Trigger* и *Pool*, которые совместно моделируют выполнение φ .

Ключевым элементом является условная обратная связь от узла *Pool* к самому себе: на этом ребре задано условие «не ψ ». Пока это условие истинно (т. е. ψ еще не наступило), цикл активен и φ выполняется непрерывно. Узлы *Trigger* и *Pool* соединены прямой связью, которая обеспечивает переход к завершению оператора в момент, когда ψ становится истинным (условие на обратной связи перестает выполняться). Данная конструкция визуально сложнее одиночных операторов, что отражает реальную сложность формального понятия «пока не» (см. рис. 7).

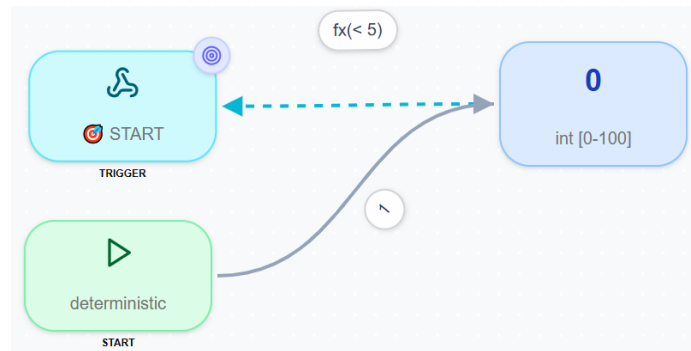


Рис. 7. Детерминированный узел Start подаёт ресурс в счётчик; цикл активен, пока не выполнится условие (в примере — пока счётчик не станет равен 5). Свойство цели триггера указывает, куда возвращается поток (на узел Start); при выполнении условия триггер разрывает цикл.

Ограниченные по времени свойства

Для ограниченных временных свойств вида $F[0, T]\varphi$ (достижимость в пределах T шагов) Tula вводит специализированный визуальный элемент — временной счетчик (*Timer*). Это узел, автоматически инкрементирующий свое значение на каждом временном шаге и связанный с *Gate*, закрывающим поток при превышении лимита T . Сравнение с UPPAAL здесь особенно уместно: часовые переменные UPPAAL выполняют аналогичную функцию, но в контексте автоматной модели, а не ресурсного потока. Соответствие всех четырех операторов сведено в табл. 2.

Табл. 2. Соответствие темпоральных операторов визуальным конструкциям.

Свойства	СЛЕДУЮЩИЙ	ВСЕГДА	КОГДА-НИБУДЬ	ДО
Темпоральный оператор	$X\varphi$	$G\varphi$	$F\varphi$	$\varphi U\psi$
Формальная запись	<i>Effect: $X(HP = \text{Atk})$</i>	$G(\text{Health} > 0), G(\text{Mana} \leq \text{MaxMana})$	$F(\text{Score} \geq 1000), F(HP \leq 0)$	<i>ShieldActive U EnemyDefeated</i>
Узел	<i>Delay($\delta = 1$)</i>	<i>Pool</i> с ограничениями min/max	<i>End</i> -узел с условием на ребре.	Узлы <i>Trigger</i> и <i>Pool</i> , соединенные обратной условной связью, на ребре указано условие выполнения цикла.
Семантика	<i>Delay(δ)</i> буферизует поток на δ	Инвариант G кодируется	<i>End</i> активируется, когда условие на ребре $\rightarrow$	Цикл моделирует « φ всегда». Ребро

	шагов, затем передает далее. Соответствует $X \wedge n$ φ ($n = \delta$)	ограничениями $\min/\max$ на <i>Pool</i> . Нарушение невозможно структурно.	true. Пометка <i>End</i> как «измеримого» автогенерирует PRISM-запрос.	обратной связи отслеживает $\psi = \text{false}$; при $\psi = \text{true}$ триггер разрывает цикл.
Аналог в верификаторе	Сброс часовой переменной в UPPAAL.	Инвариант состояния в UPPAAL / NuSMV	PRISM: $P = ? [F \text{ Score} \geq 1000]$ – автогенерация запроса.	Наиболее сложная конструкция – отражает сложность оператора U.
Пример	Урон наносится не сразу, а на следующем ходе.	Здоровье не станет отрицательным.	Победа при достижении 1000 очков.	Щит активен, пока враг не побежден.
Схема	см. рис. 4	см. рис. 5	см. рис. 6	см. рис. 7

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Вероятностные ворота

Основным примитивом для вероятностных конструкций является *Gate* в вероятностном режиме. В отличие от *Machinations*, где вероятностные ворота поддерживают только равномерное распределение по выходам, *Tula* позволяет задавать произвольные дискретные распределения с явными метками вероятностей на исходящих ребрах. Например, правило атаки с 50-процентным шансом получить ответный урон (см. лист. 2) визуализируется как *Gate* «Контратака?» с двумя исходящими ребрами: «Да (0.5)» → *Consumer* здоровья атакующего и «Нет (0.5)» → *End* (нет эффекта).

Листинг 2. Пример вероятностного события (контратака с вероятностью 0.5).

```
Event AttackCard {
    Target: Card
    Effect: Target.Health -= Self.Attack
    P[Self.Health -= Target.Attack] = 0.5
}
```

Метки вероятностей на ребрах являются обязательным элементом нотации и проверяются при валидации: сумма вероятностей на всех исходящих ребрах из *Gate* в вероятностном режиме должна равняться 1. Сравнение вероятностного ветвления *Gate* в *Machinations* и *Tula* приведено на рис. 8 и 9.

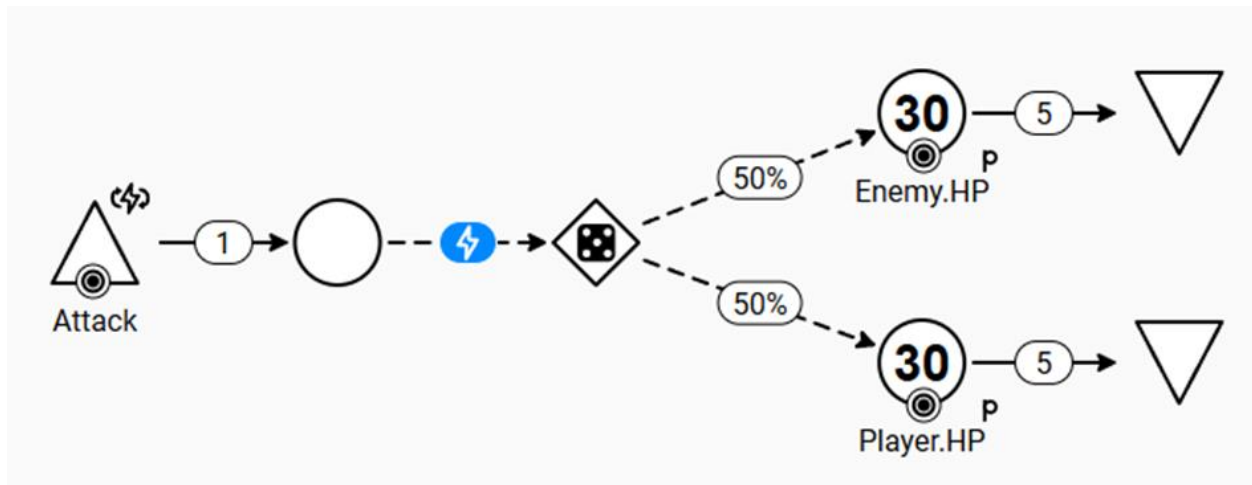


Рис. 8. Вероятностный Gate в Machinations.

В Machinations (рис. 8) *Random Gate* распределяет ресурс равномерно: веса выходов фиксированы и не могут зависеть от состояния игры, условные вероятности вида $P[\varphi | \psi]$ недоступны, верификационный запрос $P = ? [F\varphi]$ не формируется.

В Tula (рис. 9) узел Gate в вероятностном режиме допускает произвольные дискретные вероятности p_n при условии $\sum p_n = 1$, которое проверяется автоматически; значения p_n могут изменяться через ребро-модификатор, связанное с Monitor-узлом, отслеживающим текущее состояние игры.

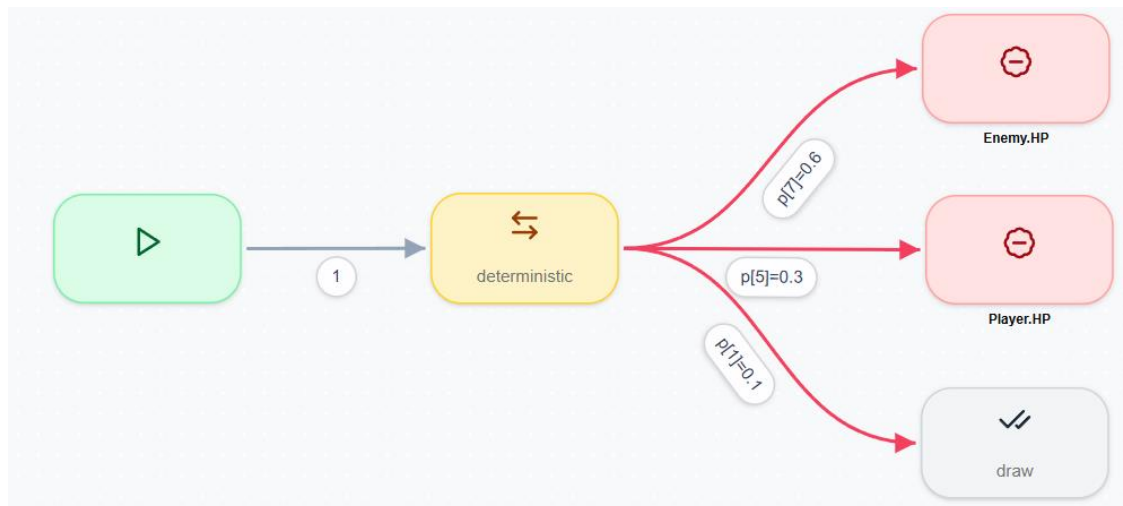


Рис. 9. Вероятностный Gate в Tula. На приведенном примере вероятность передачи одного ресурса ($p[1]$) 10%, суммарно все рёбра, выходящие из Gate должны давать 100% (при невыполнении будет выдано предупреждение).

Таким образом, вероятностная модель Tula охватывает класс механик, который нельзя получить средствами базовой нотации Machinations.

Условные вероятности

Условные вероятности вида $P[\varphi|\psi] = p$ («вероятность φ при условии ψ ») представляются цепочкой из двух *Gate*-узлов. Первый (в булевом режиме) проверяет условие ψ , второй (в вероятностном режиме, активируемый только при $\psi = \text{true}$) реализует распределение вероятностей событий при выполненном условии. Такая двухступенчатая структура соответствует формальному определению условной вероятности и сохраняет читаемость схемы.

Вероятностные свойства баланса

Особый класс составляют свойства вида $P = ? [F\varphi]$ – вычисление вероятности достижения целевого состояния. Tula не проводит вероятностную верификацию напрямую (для этого используется экспорт в PRISM [15], реализующий логику PCTL [20]), однако обеспечивает визуальный интерфейс для задания вопросов верификации. Пользователь отмечает целевой *End*-узел как «измеряемый», и инструмент автоматически формирует соответствующий PRISM-запрос $P = ?[F \text{target_state}]$ и передает его верификатору.

Марковские цепи и стохастические стратегии

Для моделирования стохастических стратегий, где вероятности переходов зависят от истории игры, Tula вводит понятие контекстно зависимого *Gate*. Такой узел обращается к значениям нескольких *Pool*-узлов при вычислении выходных вероятностей, реализуя тем самым переходную функцию марковской цепи с частичной наблюдаемостью [21]. Визуально это представляется входными ребрами-модификаторами от информационных *Pool*-узлов к *Gate* – ребрами, изображаемыми пунктирной линией для отличия от ресурсных ребер.

ПРИМЕР: ВИЗУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ КАРТОЧНОЙ ИГРЫ

Описание сценария

Под игровой механикой понимаются правило или система правил, определяющие допустимые действия игрока и их последствия в игровом мире [22].

В качестве сквозного примера используется карточная игра со стихийной системой, описанная нами в работе [3]. Игра включает двух игроков, колоды карт четырех стихий (Огонь, Вода, Земля, Воздух), систему маны с инкрементом *per turn* и боевую механику с элементарными преимуществами. Этот пример выбран как достаточно сложный, чтобы продемонстрировать все ключевые визуальные конструкции Tula, и достаточно известный, чтобы результаты были интуитивно понятны.

Визуальная структура системы маны

Система маны реализует инвариант «количество маны не превышает максимум» – $G(Mana \leq MaxMana)$ и темпоральное правило инкремента «в начале каждого хода» – $G(X(Mana = \min(Mana + 1, MaxMana)))$. Визуально это задается следующей конструкцией: *Source* «Прирост маны» с активацией *Trigger.OnTurnStart* направляет 1 единицу ресурса «Мана» в *Pool* «Мана Игрока» [0, 10]. Ограничение $max = 10$ на *Pool* автоматически отсекает избыток, реализуя оператор *min*.

Визуальная структура боевой механики

Атака карты включает как детерминированный компонент (нанесение урона цели), так и вероятностный (ответный урон с вероятностью 0.5) и темпоральный (элементарные преимущества, вычисляемые перед нанесением урона). В Tula это представляется цепочкой: *Trigger* «Атака» → *Converter* «Вычисление стихийного модификатора» → *Gate* «Тип атаки?» (детерминированная / с ответным уроном, $p = 0.5$) → ветви к соответствующим *Consumer*-узлам «Здоровье цели» и «Здоровье атакующего».

Converter «Вычисление стихийного модификатора» реализует условную логику элементарных преимуществ. Его выходной коэффициент задается формулой с обращением к *Pool*-узлам «Стихия атакующего» и «Стихия цели»; численно это $\times 1.5$ при Огонь → Воздух и $\times 1.2$ при Огонь → Игрок. Данная конструкция демонстрирует выразительные возможности *Converter* в Tula: в отличие от *Machinations*, где конвертер имеет фиксированный коэффициент, Tula допускает вычисляемые зависимые коэффициенты.

Верификационные запросы

Из визуальной модели автоматически генерируются, например, следующие верификационные запросы (см. рис. 10 и 11).

Для PRISM:

- $P=? [F \text{ Player1.Health} \leq 0]$ – вероятность поражения P1;
- $P=? [G \leq 20 \ (HP1 > 0 \ \& \ HP2 > 0)]$ – вероятность затяжной игры в 20 ходов;
- $P=? [F \leq 30 \ (EnemyHP \leq 0)]$ – вероятность победы не позднее 30-го хода;
- $R\{\text{"turns"}\}=? [F(EnemyHP \leq 0)]$ – ожидаемое число ходов до победы.

Для UPPAAL:

- $A \langle \rangle \text{GameOver}$ – проверка завершенности;
- $A[] (\text{Player1Turn} \rightarrow \text{Player2Turn})$ – корректность чередования ходов.

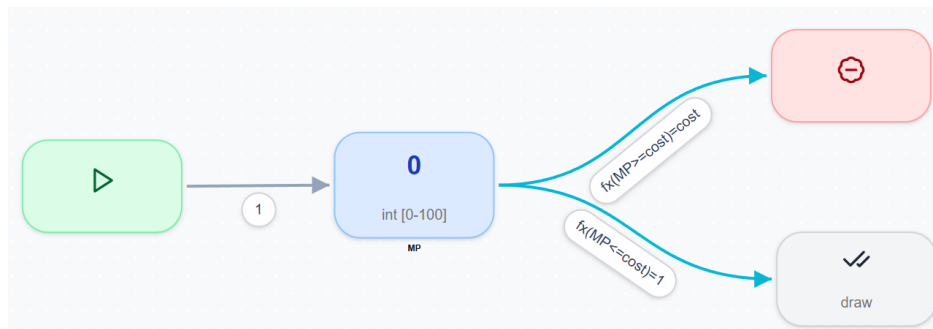


Рис. 10. Система управления ресурсом маны в нотации Tula; инвариант $G(\text{Mana} \leq \text{MaxMana}) \wedge G(\text{Mana} \geq 0)$ формулируется автоматически по структуре Pool-узла.

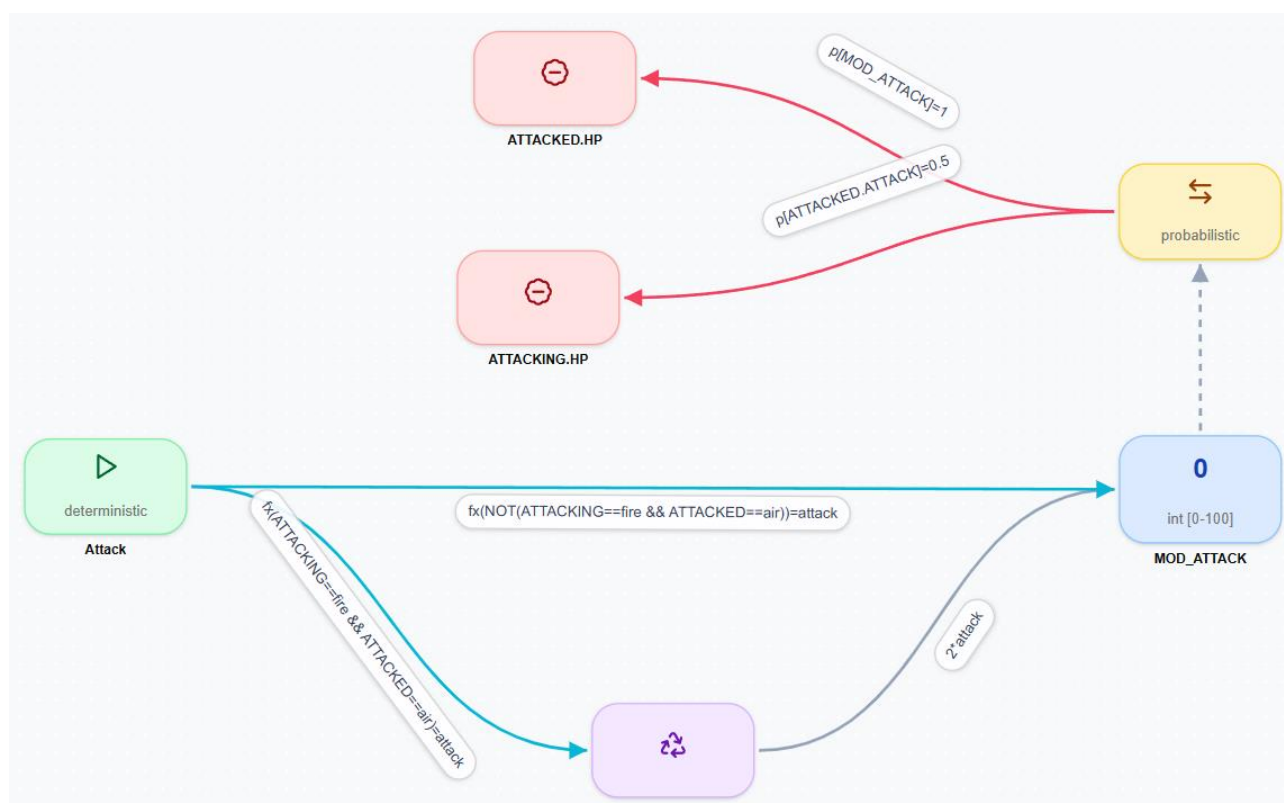


Рис. 11. Полная модель боевой механики карточной игры в нотации Tula; по структуре модели автоматически генерируются инварианты G для Pool-узла модифицированной атаки и верификационные запросы для PRISM и UPPAAL.

Подобное прямое соответствие визуальных элементов верификационным запросам является ключевым преимуществом Tula: геймдизайнер, маркируя узлы и ребра при проектировании, одновременно формулирует проверяемые свойства системы.

ТРАНСФОРМАЦИЯ ВИЗУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ В ФОРМАЛЬНУЮ СПЕЦИФИКАЦИЮ

Алгоритм трансформации

Трансформация визуальной модели в формальную спецификацию осуществляется по систематической схеме: каждому типу узла соответствует конкретная конструкция языка геймплея. Функция трансформации определяется правилами, приведенными в табл. 3.

Табл. 3. Правила трансформации узлов Tula в конструкции формальной спецификации.

Узел Tula	Конструкция спецификации	Пример
<i>Pool</i>	State { Name : Type[min,max] = init }	HP: Int[0,30]=30
<i>Source</i>	Event { Trigger; Effect }	AttackCard
<i>Gate</i> (булев)	Rule { Condition→Effect }	if Mana>=cost
<i>Gate</i> (вероятностный)	P[Effect]=p	P[X(HP-=atk)]=0.5
<i>Delay</i> (δ)	$X^{\delta}(\text{Effect})$	$X^1(\text{Self.HP-=atk})$

Пример применения правил трансформации для фрагмента боевой механики показан на рис. 12: исходный *Pool*-узел с параметрами [0, 30] преобразуется в объявление состояния, а *Source*-узел с вероятностным *Gate* и *Delay*-узлом – в событие с темпоральным вероятностным эффектом.

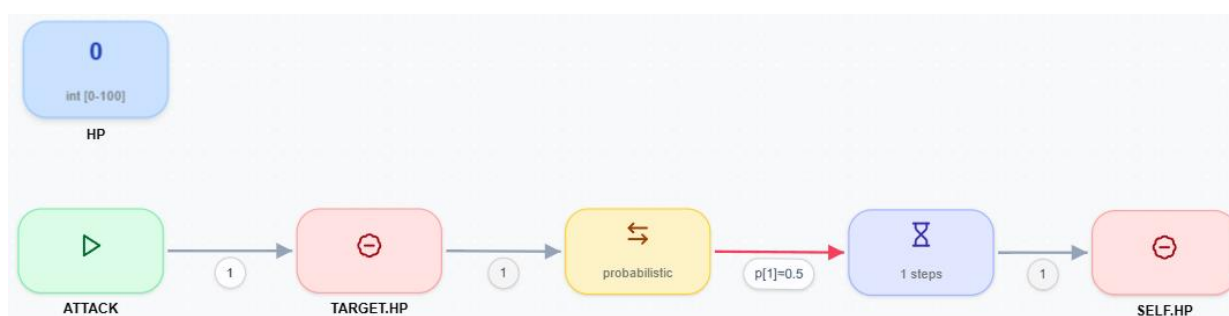


Рис. 12. Фрагмент визуальной модели боевой механики в Tula.

Трансформации узлов остальных типов строятся по той же схеме в соответствии с табл. 3. Фрагмент формальной спецификации (см. лист. 3) получен применением данных правил из визуальной модели (рис. 12).

Листинг 3. Формальная спецификация визуальной модели.

```
// Трансф. Pool → State
State {
  HP: Int[0, 30] = 30
}

// Трансф. Source + Gate + Delay
Event AttackCard {
  Target: Card
  Effect: Target.HP -= Self.Attack
  P[X(Self.HP -= Target.Attack)] X' Delay(1)
  = 0.5
}
```

Гарантии корректности

Алгоритм трансформации обеспечивает ряд гарантий корректности.

Сохранение ресурсов: для каждого типа ресурса суммарный поток из *Sources* равен суммарному потоку в *Consumers* и *Pools*, что соответствует инварианту сохранения в формальной модели.

Полнота: каждый узел визуальной модели трансформируется ровно в одну конструкцию спецификации; неоднозначностей нет.

Детерминизм: для детерминированных переходов (*Gate* в булевом режиме) формальная спецификация не содержит вероятностных операторов; вероятностные операторы появляются только там, где визуальная модель содержит вероятностные ворота.

Ограничения

Алгоритм трансформации имеет и ограничения. Некоторые сложные темпоральные свойства, выразимые в TCTL, не имеют прямого визуального аналога в текущей версии Tula: в частности, вложенные операторы Until и свойства с альтернирующей квантификацией. Для их задания пользователь может вручную дополнять автоматически сгенерированную спецификацию. Данное ограничение является предметом дальнейшего развития инструмента.

ОБСУЖДЕНИЕ

Предложенный подход к визуализации темпоральных и вероятностных элементов в Tula позволяет устранить ключевые ограничения систем-предшественников. По сравнению с Machinations, Tula обеспечивает формальную семантику визуальных элементов, допускающую автоматическую верификацию. В отличие от сетей Петри и UPPAAL, Tula сохраняет ориентацию на задачи геймдизайна: визуальный язык организован вокруг понятий ресурсов, потоков и игровых событий, а не математических абстракций.

Важным преимуществом такого подхода является принцип двунаправленного соответствия: изменения в визуальной модели немедленно отражаются в формальной спецификации и наоборот. Это поддерживает итеративный процесс разработки, при котором геймдизайнер может работать на визуальном уровне, а инженер по верификации – на уровне формальных запросов, без рассинхронизации представлений.

Сравнение с UPPAAL показало, что Tula не претендует на замену специализированных верификаторов. Вместо этого Tula выступает промежуточным слоем — визуальным интерфейсом — к формальным методам, снижающим барьер входа для геймдизайнеров при сохранении полноты верификационных возможностей через экспорт в PRISM и UPPAAL.

Среди ограничений следует отметить: неполное покрытие операторов временной логики (в особенности вложенных Until-конструкций), отсутствие поддержки непрерывного времени (Tula работает в дискретном временном домене) и текущее ограничение на число узлов в модели с приемлемым временем верификации (порядка 50–100 узлов для задач балансировки).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрен подход к визуальному представлению темпоральных и вероятностных элементов игровых механик в инструменте Tula. Проведенный анализ систем-предшественников (Machinations, сети Петри, UML-диаграммы состояний, UPPAAL) показал, что ни одна из них не обеспечивает одновременно формальной семантики, поддержки вероятностных элементов и ориентации на задачи геймдизайна.

Предложенный набор визуальных примитивов – расширенные узлы *Delay*, *Timer*, контекстнозависимый *Gate* и принцип двухуровневой спецификации – позволяет представлять темпоральные операторы X, G, F, U [23] и вероятностные конструкции непосредственно в визуальной нотации с гарантированным соответствием формальной спецификации. Автоматическая трансформация визуальной модели в спецификацию на языке геймплея, пригодную для верификации средствами PRISM и UPPAAL, замыкает цикл «дизайн → формализация → верификация → корректировка».

Таким образом, Tula не подменяет промышленные верификаторы, а служит промежуточным слоем между итеративным геймдизайном и формальной верификацией, снижая порог входа в формальные методы для практиков без потери верификационной полноты.

Направления дальнейшего развития включают расширение набора поддерживаемых темпоральных конструкций, разработку визуальной нотации для стохастических игровых стратегий и интеграцию прямой верификации внутри Tula без экспорта во внешние инструменты.

Благодарности

Работа выполнена за счет гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан образовательным организациям высшего образования, научным и иным организациям на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования их научных и научно-педагогических работников к защите докторских диссертаций и выполнению научно-исследовательских работ (Соглашение от 22.12.2025 № 12/2025-ПД-КФУ)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Adams E., Dormans J.* Game Mechanics: Advanced Game Design. Berkeley: New Riders, 2012. 360 p.
2. *Dormans J.* Engineering Emergence: Applied Theory for Game Design: dis. ... dr. sci. Amsterdam: University of Amsterdam, 2012. 328 p.
3. *Кузуркова В.В.* Интеграция темпоральных и вероятностных элементов в язык спецификации игрового процесса // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал, 2026 (принято к публикации).

4. *Рахманкулова В.Р., Кугуракова В.В.* Онлайн-инструмент Tula для балансировки видеоигр // Электронные библиотеки. 2025. Т. 28, № 4. С. 903–930.
5. *Dormans J.* Machinations: Elemental feedback patterns for game design // Proceedings of the 5th International North American Conference on Intelligent Games and Simulation (EUROSIS). 2009. P. 33–40.
6. *Dormans J.* Simulating mechanics to study emergence in games // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence and Interactive Digital Entertainment. 2011. Vol. 7, No. 3. P. 2–7.
7. *Grünvogel S.M.* Formal Models and Game Design // Game Studies. 2005. Vol. 5, No. 1. URL: <http://www.gamestudies.org/0501/gruenvogel/>
8. *Peterson J.L.* Petri Net Theory and the Modeling of Systems. Prentice Hall, 1981. 290 p.
9. *Molly M.K.* Performance Analysis Using Stochastic Petri Nets // IEEE Trans. Comput. 1982. Vol. 31, No. 9. P. 913–917.
10. *Martens C.* Generative Structural Analysis of Petri Nets // Trans. on Petri Nets and Other Models of Concurrency XI. 2016. P. 37–56.
11. *Jensen K.* Coloured Petri Nets: Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use. Vol. 1. Berlin: Springer, 1997. 234 p.
12. About the Unified Modeling Language Specification Version 2.5.1 // OMG. OMG Unified Modeling Language (OMG UML) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.omg.org/spec/UML/2.5.1> (дата обращения: 16.02.26)
13. *Segala R.* Modeling and Verification of Randomized Distributed Real-Time Systems: dis. ... dr. sci. MIT, 1995.
14. *Larsen K.G., Pettersson P., Yi W.* UPPAAL in a Nutshell // Int. J. Software Tools for Technology Transfer. 1997. Vol. 1, No. 1. P. 134–152.
15. *Kwiatkowska M., Norman G., Parker D.* PRISM 4.0: Verification of Probabilistic Real-Time Systems // Computer Aided Verification. 2011. P. 585–591.
16. *Alur R., Courcoubetis C., Dill D.* Model-Checking in Dense Real-Time // Information and Computation. 1993. Vol. 104, No. 1. P. 2–34.
17. *Klint P., van Rozen R.* Micro-Machinations: A DSL for Game Economies // Software Language Engineering: 6th Int. Conf., SLE 2013, Indianapolis. 2013. Vol. 8225. P. 36–55.

18. Кузуракова В.В. Формальный подход к пространственно-временному моделированию игровых систем // Ученые записки Казанского университета. Серия: Физико-математические науки. 2024. Т. 166, № 4. С. 532–554.

19. Сахибгареева Г.Ф., Кузуракова В.В., Большаков Э.С. Инструменты балансирования игр // Электронные библиотеки. 2023. Т. 26, № 2. С. 225–251.

20. Hansson H., Jonsson B. A Logic for Reasoning About Time and Reliability // Formal Aspects of Computing. 1994. Vol. 6, No. 5. P. 512–535.

21. Kaelbling L.P., Littman M.L., Cassandra A.R. Planning and Acting in Partially Observable Stochastic Domains // Artificial Intelligence. 1998. Vol. 101, No. 1–2. P. 99–134.

22. Sicart M. Defining game mechanics // Game studies. 2008. Vol. 8, No. 2. P. 1–14.

23. Pnueli A. The Temporal Logic of Programs // 18th Annual Symposium on Foundations of Computer Science. 1977. P. 46–57.

VISUAL MODELING OF GAME MECHANICS IN TULA: TEMPORAL AND PROBABILISTIC ASPECTS

V. V. Kugurakova¹[0000-0002-1552-4910], **V. T. Trofimchuk**²[0009-0001-9106-9614]

^{1, 2}*Kazan (Volga region) Federal University, Kazan, Russia*

¹*vlada.kugurakova@gmail.com*, ²*vselord.beta@gmail.com*

Abstract

The paper addresses the problem of visual representation of temporal and probabilistic elements in formal modeling tools for game mechanics. An analysis of existing visual modeling systems – Machinations, Petri nets, UML state diagrams, and UPPAAL – reveals their key limitations in describing complex game scenarios. An approach to visualizing temporal operators and probabilistic constructs in the Tula tool developed by the authors is proposed. A set of visual primitives is described that ensures bidirectional correspondence between visual representation and formal specification in the gameplay specification language. Examples of visual modeling of typical game scenarios with time delays, conditional probabilities, and multiplayer interac-

tions are given. The possibility of automatic transformation of visual models into formal specifications suitable for verification with PRISM and UPPAAL is demonstrated. A comparative analysis of the expressive capabilities of Tula and predecessor systems is conducted, showing that Tula is the only system among those considered that simultaneously provides formally verifiable semantics, built-in support for temporal operators (X, G, F, U), and arbitrary probability distributions, as well as a visual notation organized around resource flows and game events. The two-level specification principle with bidirectional transformation proposed in Tula closes the design–formalization–verification–correction loop, lowering the entry barrier to formal methods for practitioners without loss of verification completeness. This makes it possible to consider Tula as an intermediate layer between iterative game design and industrial verifiers.

Keywords: *visual modeling, game mechanics, temporal operators, probabilistic models, formal verification, Tula, Machinations, Petri nets.*

Acknowledgments

This work/publication was funded by a grant from the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan provided to higher education institutions, scientific and other organizations to support human resource development plans in terms of encouraging their research and academic staff to defend doctoral dissertations and conduct research activities (Agreement No. 12/2025-PD-KFU dated December 22, 2025).

REFERENCES

1. *Adams E., Dormans J.* Game Mechanics: Advanced Game Design. Berkeley: New Riders, 2012. 360 p.
2. *Dormans J.* Engineering Emergence: Applied Theory for Game Design: dis. ... dr. sci. Amsterdam: University of Amsterdam, 2012. 328 p.
3. *Kugurakova V.V.* Integrating temporal and probabilistic elements into the language of gameplay characteristics // Russian Internet Journal of Industrial Engineering, 2026 (accepted for publication).
4. *Rakhmankulova V.R., Kugurakova V.V.* Tula Online Tool for Balancing Video Games // Russian Digital Libraries Journal. 2025. Vol. 28, No. 4. P. 903–930.

5. *Dormans J.* Machinations: Elemental feedback patterns for game design // Proceedings of the 5th International North American Conference on Intelligent Games and Simulation (EUROSIS). 2009. P. 33–40.
6. *Dormans J.* Simulating mechanics to study emergence in games // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence and Interactive Digital Entertainment. 2011. Vol. 7, No. 3. P. 2–7.
7. *Grünvogel S.M.* Formal Models and Game Design // Game Studies. 2005. Vol. 5, No. 1. URL: <http://www.gamestudies.org/0501/gruenvogel/>
8. *Peterson J.L.* Petri Net Theory and the Modeling of Systems. Prentice Hall, 1981. 290 p.
9. *Molly M.K.* Performance Analysis Using Stochastic Petri Nets // IEEE Trans. Comput. 1982. Vol. 31, No. 9. P. 913–917.
10. *Martens C.* Generative Structural Analysis of Petri Nets // Trans. on Petri Nets and Other Models of Concurrency XI. 2016. P. 37–56.
11. *Jensen K.* Coloured Petri Nets: Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use. Vol. 1. Berlin: Springer, 1997. 234 p.
12. About the Unified Modeling Language Specification Version 2.5.1 // OMG. OMG Unified Modeling Language (OMG UML). URL: <https://www.omg.org/spec/UML/2.5.1>
13. *Segala R.* Modeling and Verification of Randomized Distributed Real-Time Systems: dis. ... dr. sci. MIT, 1995.
14. *Larsen K.G., Pettersson P., Yi W.* UPPAAL in a Nutshell // Int. J. Software Tools for Technology Transfer. 1997. Vol. 1, No. 1. P. 134–152.
15. *Kwiatkowska M., Norman G., Parker D.* PRISM 4.0: Verification of Probabilistic Real-Time Systems // Computer Aided Verification. 2011. P. 585–591.
16. *Alur R., Courcoubetis C., Dill D.* Model-Checking in Dense Real-Time // Information and Computation. 1993. Vol. 104, No. 1. P. 2–34.
17. *Klint P., van Rozen R.* Micro-Machinations: A DSL for Game Economies // Software Language Engineering: 6th Int. Conf., SLE 2013, Indianapolis. 2013. Vol. 8225. P. 36–55.
18. *Kugurakova V.V.* A formal approach to spatio-temporal modeling of game systems // Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki. 2024. Vol. 166, No. 4. P. 532–554.

19. *Sahibgareeva G.F., Kugurakova V.V., Bolshakov E.S.* Game Balance Tools // Russian Digital Libraries Journal. 2023. Vol. 26, No. 2. P. 225–251.
20. *Hansson H., Jonsson B.* A Logic for Reasoning About Time and Reliability // Formal Aspects of Computing. 1994. Vol. 6, No. 5. P. 512–535.
21. *Kaelbling L.P., Littman M.L., Cassandra A.R.* Planning and Acting in Partially Observable Stochastic Domains // Artificial Intelligence. 1998. Vol. 101, No. 1–2. P. 99–134.
22. *Sicart M.* Defining game mechanics // Game studies. 2008. Vol. 8, No. 2. P. 1–14.
23. *Pnueli A.* The Temporal Logic of Programs // 18th Annual Symposium on Foundations of Computer Science. 1977. P. 46–57.
-

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



КУГУРАКОВА Влада Владимировна – кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой индустрии разработки видеоигр Института информационных технологий и интеллектуальных систем Казанского федерального университета. Область научных интересов – формальные методы верификации видеоигр.

Vlada Vladimirovna KUGURAKOVA – PhD, Head of the Department of Video Game Development Industry (GD Chair) at the Institute of Information Technology and Intelligent Systems, Kazan Federal University. Research interests include the formal methods of video game verification.

email: vlada.kugurakova@gmail.com

ORCID: 0000-0002-1552-4910



ТРОФИМЧУК Всеволод Тарасович – лаборант-исследователь кафедры индустрии разработки видеоигр Института информационных технологий и интеллектуальных систем Казанского федерального университета. Область научных интересов – использование LLM для видеоигр в реальном времени.

Vsevolod Tarasovich TROFIMCHUK – laboratory research assistant at the Department of Video Game Development Industry at the Institute of Information Technology and Intelligent Systems, Kazan Federal University. Research interests include the application of LLM in video games.

email: vselord.beta@gmail.com

ORCID:0009-0001-9106-9614

Материал поступил в редакцию 25 апреля 2026 года

ПРОЕКТИРОВАНИЕ БЕЗНАСИЛЬСТВЕННОЙ БОЕВОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ДЕТСКОЙ RPG-ИГРЫ

А. А. Кутузов¹ [0009-0004-6652-2968], М. В. Шматко² [0000-0002-7255-8885]

^{1, 2}Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

¹kutuzovschool@mail.ru, ²marin298@gmail.com

Аннотация

Статья посвящена проблеме проектирования безнасильственной боевой системы для детской ролевой игры. В ней представлены результаты исследования, целью которого была получить эмпирические данные для определения баланса между механиками тактического контроля и силового воздействия.

Научная новизна исследования состоит в эмпирическом выявлении структуры восприятия детьми 6–12 лет различных типов игровых механик: тактических (опосредованное воздействие на врага), тактико-силовых (обезвреживание без прямого урона) и силовых (нанесение прямого урона). На основе сочетания методов карточной сортировки и ассоциативного анализа построена матрица сходства механик, отражающая их категоризацию в детском сознании, выявлены устойчивые эмоциональные реакции и ассоциации детей относительно ключевых элементов боевой системы (лед – контроль, ветер – юмор, электричество – изобретательность, огонь – опасность и пр.).

Выделены три кластера механик («Пропуск хода», «Ослабление и ограничение», «Чистый урон») и составлен рейтинг предпочтений, в котором тактические механики заняли лидирующие позиции, тогда как силовые механики оказались не приоритетными и были охарактеризованы детьми как «скучные». Таким образом, выдвинутая гипотеза относительно предпочтений детской аудитории полностью подтверждена: ядро безопасной боевой системы должны составлять безнасильственные тактические механики (70–80%), обеспечивающие интеллектуальную вовлеченность, в сочетании с тактико-силовыми механиками, направленными на эмоциональную разрядку.

Практическая значимость исследования определяется возможностью применения сформированных рекомендаций при проектировании детских видеоигр, а также при адаптации предложенной методологии для аналогичных исследований.

Ключевые слова: видеоигра, безнасильственная боевая система, детская видеоигра, ролевая игра, тактические механики, силовые механики, тактико-силовые механики, карточная сортировка, ассоциативный анализ, геймдизайн, эмпирическое исследование, игровой баланс.

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании боевых систем для детских видеоигр перед разработчиками возникает задача определения оптимального баланса между механиками силового воздействия и механиками тактического контроля. С одной стороны, боевые системы, построенные исключительно на прямом силовом воздействии (нанесении урона, уничтожении врагов), могут нести в себе риск провокации нежелательных эмоциональных реакций у детской аудитории и даже вызывать агрессию. С другой стороны, полностью безнасильственные боевые системы, ориентированные только на тактические манипуляции и ограничения действий противника, могут не обеспечить ребенку эмоциональной разрядки, которую он ожидает от игрового противостояния антагонистам [1, 2].

Таким образом, актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью поиска работающих способов совмещения этичности и увлекательности в боевых системах, проектируемых для детей 6–12 лет.

Анализ существующих подходов к проектированию детских RPG-игр показал, что проблема смягчения насилия чаще всего решается через визуальную цензуру (отсутствие крови, «безобидное» исчезновение врагов) либо через полный отказ от прямых боевых столкновений в пользу нарративных решений [2, 3]. Однако вопросы, как сами дети дифференцируют разные типы механик, какие из них воспринимаются ими как «жестокие», а какие – как «умные» и «интересные», остаются недостаточно изученными. Исследователи детского игрового опыта подчеркивают важность учета не только поведенческих, но и эмоциональ-

ных реакций детей на игровые механики [4]. Это особенно важно на этапе предварительного проектирования, когда в решения гейм-дизайнера еще можно внести содержательные коррективы.

Цель настоящего исследования – получить эмпирические данные, необходимые для определения баланса между механиками тактического контроля и силового воздействия при проектировании безнасильственной боевой системы для детской ролевой игры.

Нами выдвинута следующая гипотеза: боевым системам, которые предполагают победу над врагом исключительно с помощью чистой силы либо чистой тактики, детская аудитория предпочтет систему, сочетающую в себе два типа механик:

- безнасильственные тактические механики, обеспечивающие интеллектуальную вовлеченность игрока (манипуляция окружением, контроль действий противника, комбинаторика способностей);
- катарсические механики силового воздействия (разрушение объектов, обезвреживание антагонистов, эффектные стихийные атаки).

Практическая значимость результатов исследования определяется возможностью их непосредственного применения в процессе проектирования боевой системы новой детской RPG-игры. Кроме того, предложенная методология сбора и анализа эмпирических данных (сочетание методов карточной сортировки и ассоциативного анализа), а также сформулированные на ее основе рекомендации по балансировке механик могут быть адаптированы и использованы другими разработчиками, ориентированными на создание этичных и увлекательных игровых продуктов для детской аудитории.

ПОИСК БАЛАНСА МЕЖДУ МЕХАНИКАМИ ТАКТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ И СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ДЕТСКОЙ RPG-ИГРЫ

Для поиска баланса и проверки гипотезы эмпирического исследования запланированные к реализации механики боевой системы новой RPG-игры были разделены на три типа: тактические (механики опосредованного воздействия на врага), тактико-силовые (или «условно силовые» механики) и силовые. Приведем их краткое описание.

1. Тактические механики

К этому типу отнесены механики, которые позволяют тактически ограничить действие врагов без применения силового воздействия на них [5]. Среди механик, запланированных для новой видеоигры, выделим следующие заклинания:

- «Огненная стена», сужающая круг доступных для врага действий;
- «Ледяная клетка», заставляющая врага пропустить один ход, после которого она тает;
- «Шквальный ветер», из-за которого при следующей физической атаке враг обязательно промахнется;
- «Электробарьер», который обращает боевые действия врага против него самого.

2. Тактико-силовые механики

К этому типу отнесены силовые механики, эффект которых направлен не на прямое причинение вреда врагам, а на их обезвреживание, отключение, трансформацию [6]. Это:

- «Огненный шар», уничтожающий оружие врага и лишаящий его возможности атаковать;
- «Солнечный удар», который напекает врагу голову, из-за чего тот теряет сознание, и бой заканчивается;
- «Морозная скорлупа», которая замораживает врага и заставляет его пропустить один ход;
- «Ураган», который подкидывает врага в воздух, в результате чего он теряет свое боевое оружие и пропускает ход;
- «Статическое электричество», из-за которого враг получает урон электричеством и не может больше атаковать.

3. Силовые механики

К этому типу были отнесены механики прямого силового воздействия на врагов, т. е. причинения им вреда, боли или полного уничтожения [5, 6]. Это:

- «Удар мечом», который наносит врагу физический урон;
- «Острая сосулька», которая летит во врага и наносит ему ледяной урон;

– «Порыв ветра», который стремительно окружает врага и наносит ему ветреный урон;

– «Молния», которая бьет по врагу и наносит ему электрический урон.

Включение последнего типа игровых механик необходимо, чтобы проверить гипотезу исследования: будут они вызывать интерес либо, наоборот, отторжение у детской аудитории?

МЕТОДЫ И ПРОЦЕДУРА ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках эмпирического исследования были выбраны и реализованы два метода.

1. *Карточная сортировка* – это метод исследования, который применяется, чтобы понять, как пользователи группируют и категоризируют информацию.

Основная его ценность состоит в возможности получить эмпирические данные относительно паттернов мышления детей, когда новая видеоигра находится еще на стадии проектирования: карточки с цветными изображениями, близкими по дизайну и визуальному стилю к будущей игре, позволяют достаточно глубоко «погрузить» таких респондентов в ее замысел [7, 8]. Соответственно, он был выбран для верификации и оптимизации уже сформированных решений гейм-дизайнера относительно механик боевой системы новой видеоигры.

2. *Ассоциативный анализ* – это метод исследования, направленный на выявление эмоциональных реакций пользователей, ассоциаций и скрытых смысловых связей в их сознании [9].

Он органично дополняет карточную сортировку, позволяя обходить социально-желаемые ответы респондентов и выявлять эмоциональные факторы, определяющие их паттерны мышления. Для детской аудитории использование ассоциативного анализа эффективно, поскольку метод обеспечивает:

– повышение их вовлеченности в исследование за счет игровой формы метода;

– обход вербальных ограничений, часто распространенных у детей;

– выявление не только очевидных, но и «скрытых» эмоциональных реакций.

В рамках настоящего эмпирического исследования применение метода карточной сортировки в сочетании с методом ассоциативного анализа дало ответы на два ключевых вопроса: «как дети структурируют механики боевой системы» (осознанная категоризация) и «какой эмоциональный и смысловой след у них оставляют эти механики» (глубинное восприятие).

Опишем также процедуру исследования. Она включала пять основных этапов.

Этап 1. Подготовка материалов и организация исследования

На данном этапе были сформированы две возрастные категории детей-респондентов: младшая (6–8 лет) и старшая (9–12 лет). В каждую из них было набрано по 15 человек (всего $N = 30$)¹.

Для реализации выбранных методов было подготовлено 15 наборов карточек на разные типы механик боевой системы (тактические, тактико-силовые и силовые), в каждом из которых визуальны название и краткое описание самой механики, действие, которое должен совершить игрок, окружение и результат воздействия механики на врага. На рис. 1 представлены примеры карточек, которые применялись в рамках настоящего эмпирического исследования.



Рис. 1. Примеры карточек с разными типами механик боевой системы.

¹ На участие в эмпирическом исследовании всех несовершеннолетних детей-респондентов предварительно было получено информированное согласие их родителей.

Как видно из примеров представленных карточек, для визуализации механик боевой системы выбран абстрактный враг без четко выраженных характеристик. Это необходимо, чтобы снизить влияние нарративного контекста и унифицировать восприятие механик детьми-респондентами из разных возрастных категорий.

После подготовки материалов исследования и проведения организационных мероприятий с каждым респондентом была проведена индивидуальная онлайн-сессия, направленная на сбор эмпирических данных. Для этого был использован такой инструмент, как «VK Доска».

Этап 2. Открытая карточная сортировка

Каждому ребенку-респонденту было дано задание внимательно изучить содержание всех карточек, на которых визуально представлены разные типы механик боевой системы новой видеоигры (на экране карточки, относящиеся к тактическим механикам, были перемешаны с карточками, относящимися к тактико-силовым и силовым механикам), а затем сгруппировать их по своему усмотрению на 3–6 кластеров и дать им свое название.

Этап 3. Ассоциативный анализ

После завершения карточной сортировки детям-респондентам было предложено ответить на несколько открытых вопросов относительно механик боевой системы новой видеоигры:

– какой тебе кажется эта способность (механика)? Может быть, она сильная, веселая, страшная? Или, может быть, какая-нибудь еще?

– представь, пожалуйста, что ты используешь эту способность (механику) против врага: каким с ней ты теперь кажешься окружающим? Всемогущим волшебником, бесстрашным богатырем, хитрым и ловким или, может, жестоким и злым? А может, другие считают тебя с ней каким-нибудь еще?

– с чем ассоциируется у тебя эта способность (механика)? Например, с энергией, спокойствием, силой, опасностью, контролем, защитой? Может быть, с чем-нибудь еще?

Ответы респондентов по каждому вопросу фиксировались в специально созданные формы для последующего анализа и интерпретации.

Этап 4. Прямое ранжирование механик боевой системы

В конце сессии дети-респонденты упорядочивали карточки с механиками боевой системы таким образом, чтобы первая позиция соответствовала механике, наиболее интересной для них, а последняя – наименее интересной. Эта процедура позволила определить градацию в их предпочтениях.

Этап 5. Анализ и формулирование выводов

После сбора эмпирические данные были обработаны и проанализированы. На их основе сформированы и визуализированы основные кластеры механик боевой системы, составлена матрица их сходства, также выявлены наиболее яркие эмоции, ассоциации относительно каждой из них, создан рейтинг, позволяющий определить наиболее приоритетные механики для создания безнасиленной боевой системы детской RPG-игры.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ БОЕВОЙ СИСТЕМЫ НОВОЙ RPG-ИГРЫ ДЛЯ ДЕТЕЙ

Рассмотрим данные, полученные в ходе эмпирического исследования.

В результате карточной сортировки 24 из 30 детей-респондентов (11 из младшей и 13 из старшей возрастных категорий) мы распределили все карточки с механиками боевой системы на три кластера и дали им свои названия:

1. «Пропуск хода»: дети-респонденты отнесли к этому кластеру механики «Ледяная клетка», «Морозная скорлупа», «Ураган», «Солнечный удар» и охарактеризовали его еще как «Остановка».

2. «Ослабление и ограничение»: к нему были отнесены механики «Огненная стена», «Солнечное пекло», «Мерзлый воздух», «Шквальный ветер», «Электробарьер» и «Статическое электричество».

3. «Чистый урон»: дети-респонденты отнесли к нему механики «Удар мечом», «Огненный шар», «Острая сосулька», «Порыв ветра», «Молния» и охарактеризовали его еще как «Удары» или «Механики урона».

Наиболее «спорной» с точки зрения отнесения к определенному кластеру для детей оказалась механика «Статическое электричество», которая наносит урон врагу и не дает ему больше атаковать: 9 из 30 респондентов (6 из младшей и 3 из старшей возрастных категорий) определили ее в кластер «Чистый урон»,

15 из 30 респондентов (5 из младшей и 10 из старшей возрастных категорий) отнесли в кластер «Ослабление и ограничение», а остальные 6 (4 из младшей и 2 из старшей возрастных категорий) – в четвертый, неосновной кластер, связанный со стихиями (огонь, лед, ветер, электричество).

На рис. 2 представлены основные кластеры механик боевой системы, сформированные в результате карточной сортировки. Как видим, сформированные детьми-респондентами кластеры достаточно точно соответствуют трем ранее выделенным типам: тактическим, тактико-силовым и силовым механикам боевой системы. Это говорит о том, что детская аудитория дифференцирует их вполне осознанно. Поэтому при проектировании боевой системы для детской RPG-игры можно намеренно смещать акцент в сторону тактических механик, чтобы победа достигалась игроками через хитрость, комбинаторику, позиционирование или манипуляцию средой, а грубая сила (кластер «чистый урон») либо отсутствовала, либо заведомо была неэффективной. Такая боевая система не будет провоцировать агрессию, а будет с самого начала восприниматься как способ для ненасильственного и интуитивно понятного противостояния врагам.

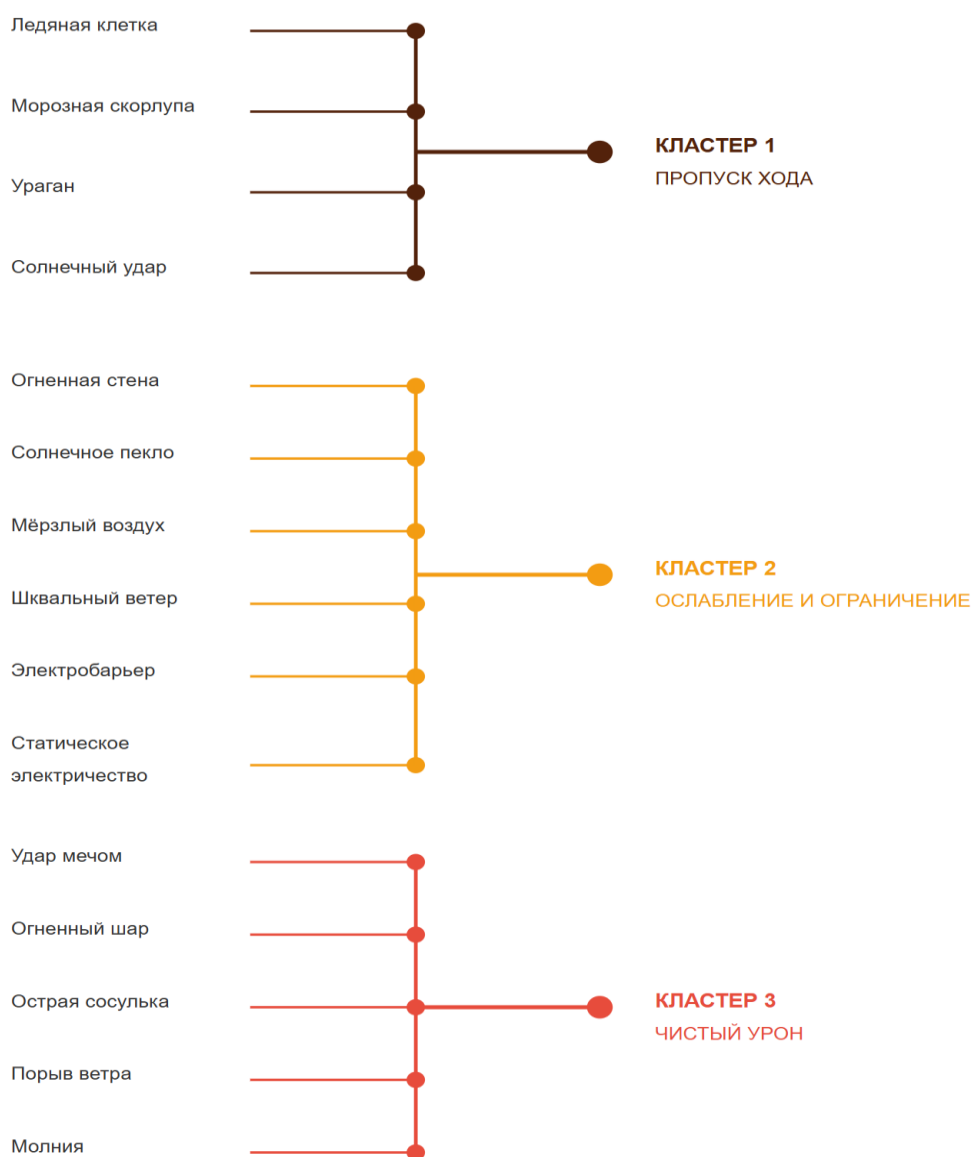


Рис. 2. Основные кластеры механик боевой системы.

Представим теперь матрицу сходства механик боевой системы (см. табл. 1). На основе результатов карточной сортировки для каждой пары механик было определено соотношение количества респондентов, которые отнесли их в один кластер, к общему количеству респондентов, участвовавших в исследовании. По этому соотношению была определена степень сходства, где коэффициент 1 означает наибольшую степень сходства механик в восприятии детей-респондентов, а коэффициент 0 – наименьшую степень сходства.

Табл. 1. Матрица сходства механик боевой системы.

Механика	Огненная стена	Солнечное пекло	Мерзлый воздух	Ледяная клетка	Морозная скорлупа	Шквальный ветер	Электробарьер	Солнечный удар	Ураган	Статическое электричество	Удар мечом	Огненный шар	Острая сосулька	Порыв ветра	Молния
Огненная стена	—	0.70	0.43	0.37	0.37	0.63	0.63	0.43	0.43	0.50	0.20	0.43	0.20	0.30	0.30
Солнечное пекло	0.70	—	0.57	0.30	0.30	0.57	0.43	0.57	0.30	0.37	0.30	0.50	0.30	0.37	0.37
Мерзлый воздух	0.43	0.57	—	0.63	0.63	0.57	0.37	0.57	0.50	0.37	0.30	0.30	0.43	0.37	0.37
Ледяная клетка	0.37	0.30	0.63	—	0.93	0.37	0.20	0.57	0.63	0.20	0.13	0.20	0.37	0.30	0.20
Морозная скорлупа	0.37	0.30	0.63	0.93	—	0.37	0.20	0.57	0.63	0.20	0.13	0.20	0.37	0.30	0.20
Шквальный ветер	0.63	0.57	0.57	0.37	0.37	—	0.50	0.43	0.57	0.57	0.20	0.30	0.37	0.57	0.43
Электробарьер	0.63	0.43	0.37	0.20	0.20	0.50	—	0.20	0.37	0.57	0.13	0.30	0.13	0.20	0.37
Солнечный удар	0.43	0.57	0.57	0.57	0.57	0.43	0.20	—	0.70	0.30	0.20	0.43	0.30	0.30	0.30
Ураган	0.43	0.30	0.50	0.63	0.63	0.57	0.37	0.70	—	0.43	0.07	0.30	0.37	0.37	0.37
Статическое электричество	0.50	0.37	0.37	0.20	0.20	0.57	0.57	0.30	0.43	—	0.13	0.20	0.20	0.30	0.57
Удар мечом	0.20	0.30	0.30	0.13	0.13	0.20	0.13	0.20	0.07	0.13	—	0.43	0.50	0.50	0.30
Огненный шар	0.43	0.50	0.30	0.20	0.20	0.30	0.30	0.43	0.30	0.20	0.43	—	0.43	0.50	0.37
Острая сосулька	0.20	0.30	0.43	0.37	0.37	0.37	0.13	0.30	0.37	0.20	0.50	0.43	—	0.57	0.50
Порыв ветра	0.30	0.37	0.37	0.30	0.30	0.57	0.20	0.30	0.37	0.30	0.50	0.50	0.57	—	0.57
Молния	0.30	0.37	0.37	0.20	0.20	0.43	0.37	0.30	0.37	0.57	0.30	0.37	0.50	0.57	—

Из таблицы видно, что наибольшие значения коэффициента сходства (0.93) имеет пара механик «Ледяная клетка» и «Морозная скорлупа». Это две тактические механики, которые нельзя разделять, так как в сознании детей-респондентов они должны использоваться против врагов в связке. Соответственно, при проектировании боевой системы стоит усилить результат применения одной механики с помощью другой. Например, можно скорректировать действие механики «Морозная скорлупа» с полной заморозки врага на его замедление (рис. 3). Тогда в ходе противостояния одновременно двум врагам можно будет

сначала их замедлить, а когда они окажутся рядом, окончательно остановить, заточив в «Ледяной клетке».



Рис. 3. Карточка тактической механики «Морозная скорлупа».

Наименьшие значения коэффициента сходства имеют механики «Удар мечом» в сочетании с механикой «Ураган» (0.07), а также в сочетании с механиками «Ледяная клетка», «Морозная скорлупа», «Электробарьер» и «Статическое электричество» (по 0.13). Низкий коэффициент сходства также был определен у пары механик «Острая сосулька» и «Электробарьер» (0.13).

Это механики из различных кластеров, которые в сознании детей-респондентов интерпретируются как антагонистические. Поэтому при проектировании безнасильственной боевой системы с их помощью можно создавать так называемые «моральные дилеммы», чтобы дети могли ощутить ценность своего выбора в пользу тактических либо тактико-силовых механик. Другой вариант – можно спроектировать боевую ситуацию, когда в паре антагонистов тактическая механика является прямым контрприемом против силовой механики. Например, если против врага применена механика «Электробарьер», то дальнейшее действие силовой механики «Острая сосулька» уже не нанесет ему прямого урона, она изогнется и станет бесполезной.

Кроме того, есть механики, коэффициент сходства которых приближен к среднему значению – 0.37. Их достаточно много, и они находятся в различных

кластерах. Например, это механика «Молния» в сочетании с механиками «Электробарьер», «Солнечное пекло», «Огненный шар» и «Ураган». Это механики двойственной природы, в отношении которых мнения детей-респондентов различались. Поэтому для проектирования безнасильственной боевой системы между этими механиками необходимо установить интуитивно понятную связь. Например, силовую механику «Огненный шар» стоит сбалансировать с помощью тактического контекста – расширить варианты ее применения, чтобы огнем можно было нанести урон не только врагу, но и его оружию. Для тактических механик со средними показателями стоит активно использовать анимацию, чтобы повысить эмоциональный эффект от ненасильственного противодействия врагу.

Таким образом, построенные матрицы сходства механик позволили определить основной принцип проектирования безнасильственной боевой системы для новой видеоигры: между механиками из различных кластеров необходимо установить этичные и интуитивно понятные смысловые связи, базирующиеся на их синергии, антагонизме и двойственности. Материализация этих смысловых связей в конкретные игровые правила и визуальные образы обеспечит детской аудитории безопасное, осмысленное и эмоционально насыщенное боевое столкновение.

Далее представим результаты ассоциативного анализа.

В ответах детей-респондентов на открытый вопрос «Какой тебе кажется эта способность (механика)? Может, она сильная, веселая, страшная? Или, может быть, какая-нибудь еще?» были выделены маркерные слова и эмоциональные реакции. Это позволило распределить механики боевой системы на пять категорий: «когнитивное превосходство», «эстетическое удовольствие», «юморное торжество», «этическая приемлемость» и «сила и мощь» (см. табл. 2).

Табл. 2. Результаты анализа ассоциаций в ответах на вопрос «Какой тебе кажется эта способность (механика)?».

Категория	Маркерные слова	Механики боевой системы	Эмоциональный вектор
Когнитивное превосходство	«умная», «хитрая», «продуманная», «коварная», «стратегическая»	«Статическое электричество», «Ледяная клетка», «Электробарьер»	гордость, самоуважение
Эстетическое удовольствие	«красивая», «блестящая», «сияющая»	«Ледяная клетка», «Молния», «Морозная скорлупа»	восхищение, радость
Юморное торжество	«веселая», «смешная», «озорная», «клоун»	«Шквальный ветер», «Ураган», «Статическое электричество»	смех, злорадство
Этическая приемлемость	«добрая», «не больно», «жалко», «справедливая», «аккуратная»	«Ледяная клетка», «Солнечный удар», «Морозная скорлупа»	спокойствие, чистая совесть
Сила и мощь	«сильная», «мощная», «грозная», «сокрушительная»	«Огненный шар», «Молния», «Солнечный удар»	уверенность

Рассмотрим теперь результаты ассоциативного анализа, полученные из ответов детей-респондентов на открытый вопрос «Представь, пожалуйста, что ты используешь эту способность (механику) против врага: каким с ней ты теперь кажешься окружающим? Всемогушим волшебником, бесстрашным богатырем, хитрым и ловким или, может, жестоким и злым? А может, другие считают тебя с ней каким-нибудь еще?» (см. табл. 3).

Ассоциации детей-респондентов относительно атрибутов, которые они присваивали каждой способности (механике), позволили выделить пять архетипов игроков: «Снежная королева» («Ледяной судья»), «Безумный ученый» («Техномаг»), «Повелитель стихий» («Громовержец»), «Хитрый проказник» («Трикстер»), «Богатырь» («Честный воин»). Наиболее яркую эмоциональную реакцию

у них в ходе сессий вызывали первые три архетипа, меньше всего эмоций было отмечено на архетип «Богатырь».

Табл. 3. Результаты анализа ассоциаций в ответах на вопрос «Каким с этой способностью (механикой) ты кажешься окружающим?».

Архетип	Механики боевой системы	Атрибуты игрока	Типичный возраст
«Снежная королева» («Ледяной судья»)	«Ледяная клетка», «Морозная скорлупа», «Мерзлый воздух»	спокойный, строгий, справедливый, красивый, тихий, властный	8–12 лет
«Безумный ученый» («Техномаг»)	«Статическое электричество», «Электробарьер», «Молния»	умный, хитрый, коварный, изобретательный	7–12 лет
«Повелитель стихий» («Громовержец»)	«Персональный ураган», «Огненный шар», «Молния»	могучий, грозный, яркий, эффектный	6–9 лет
«Хитрый проказник» («Трикстер»)	«Шквальный ветер», «Статическое электричество», «Порыв ветра»	веселый, озорной, смешной, хулиганистый	6–10 лет
«Богатырь» («Честный воин»)	«Удар мечом»	простой, честный, обычный, смелый	6–12 лет

В табл. 4 приведены результаты ассоциативного анализа, полученные из ответов детей-респондентов на последний и наиболее общий вопрос «С чем ассоциируется у тебя эта способность? Например, с энергией, спокойствием, силой, опасностью, контролем, защитой? Может быть, с чем-нибудь еще?».

Табл. 4. Результаты анализа ассоциаций в ответах на вопрос «С чем ассоциируется у тебя эта способность?».

Ключевой элемент механики боевой системы	Ассоциации
Лед	Контроль, порядок, тишина, справедливость: лед устойчиво ассоциируется с остановкой, тишиной и спокойствием. Примеры оценочных высказываний детей-респондентов: <i>«Враг красиво застывает, как статуя», «Сразу становится тихо».</i>
Электричество	Хитрость, изобретение, «умная сила», неожиданность: электричество воспринимается как технология, а не как стихия природы. Примеры оценочных высказываний детей-респондентов: <i>«Я как изобретатель, ученый», «Невидимое, кусачее», «Батарейка».</i>
Ветер	Шалость, комедия, неуклюжесть, потеря контроля над телом: ветер – единственная стихия, устойчиво связанная с юмором. Примеры оценочных высказываний детей-респондентов: <i>«Враг качается на одной ноге, как клоун», «Как кот, который сбивает все со стола», «Он чувствует себя глупо».</i>
Огонь	Опасность, мощь: огонь у многих, особенно из младшей возрастной категории, ассоциируется с риском и вызывает страх. Примеры оценочных высказываний детей-респондентов: <i>«А вдруг я случайно лес подожгу?», «Монстр боится огня. А когда меч сгорает – он в ужасе».</i>
Меч	Простота, справедливость, традиция: атака мечом знакома и понятна всем детям-респондентам, но не вызывает ярких эмоций. Примеры оценочных высказываний детей-респондентов: <i>«Честно», «Справедливо, но неинтересно».</i>

Анализ ассоциаций детей-респондентов относительно ключевых элементов противостояния врагу (лед, электричество, ветер, огонь и меч) показал, что механики, обыгрывающие использование природных стихий, вызывают у детей-респондентов повышенный интерес по сравнению с механиками, направленными на нанесение прямого урона врагу. Однако огонь (ключевой элемент ме-

ханики «Огненный шар») ассоциируется у большинства из них с опасностью, причем не только для себя, но и для окружающей природы – леса, изображенного на карточке (рис. 4). Эта механика требует корректировки и более осторожной подачи детской аудитории.



Рис. 4. Карточка силовой механики «Огненный шар».

Подведем также итоги прямого ранжирования детьми-респондентами механик боевой системы новой видеоигры. В табл. 5 показаны их рейтинг и распределение по трем кластерам и типам.

Согласно результатам прямого ранжирования абсолютным лидером для детей-респондентов стала тактическая механика «Ледяная клетка» (рис. 5).

Табл. 5. Общий рейтинг механик боевой системы.

Ранг	Механика боевой системы	Средний ранг	Кластер и тип механики
1	«Ледяная клетка»	2.86	Кластер «Пропуск хода»: тактические механики
2	«Статическое электричество»	3.29	Кластер «Ослабление и ограничение»: тактико-силовые механики
3	«Ураган»	3.93	Кластер «Пропуск хода»: тактические механики
4	«Солнечный удар»	5.86	Кластер «Пропуск хода»: тактические механики
5	«Электробарьер»	6.64	Кластер «Ослабление и ограничение»: тактико-силовые механики
6	«Мерзлый воздух»	7.14	Кластер «Ослабление и ограничение»: тактико-силовые механики
7	«Морозная скорлупа»	7.43	Кластер «Пропуск хода»: тактические механики
8	«Огненная стена»	7.57	Кластер «Ослабление и ограничение»: тактико-силовые механики
9	«Молния»	8.43	Кластер «Чистый урон»: силовые механики
10	«Солнечное пекло»	9.14	Кластер «Ослабление и ограничение»: тактико-силовые механики
11	«Огненный шар»	9.79	Кластер «Чистый урон»: силовые механики
12	«Шквальный ветер»	9.93	Кластер «Ослабление и ограничение»: тактико-силовые механики
13	«Острая сосулька»	11.36	Кластер «Чистый урон»: силовые механики
14	«Удар мечом»	12.14	Кластер «Чистый урон»: силовые механики
15	«Порыв ветра»	12.50	Кластер «Чистый урон»: силовые механики



Рис. 5. Карточка тактической механики «Ледяная клетка».

Отметим, что тактические механики в целом оказались приоритетными для детей-респондентов, особенно по сравнению с чисто силовыми механиками, которые характеризовались ими как «скучные», «простые» и «без фантазии». Среди всех силовых механик только «Молния» оказалась на 9-й позиции в рейтинге (рис. 6).



Рис. 6. Карточка силовой механики «Молния».

Таким образом, выдвинутая нами гипотеза о том, что детская аудитория предпочитает боевую систему, основанную на интересной магии (тактические механики), а не на простых физических способностях (силовые механики), подтвердилась.

Эмпирические данные показали, что ядро безопасной боевой системы новой RPG-игры должны составлять различные комбинации механик тактического контроля, обеспечивающие игрокам ощущение когнитивного превосходства над врагами. Однако для обеспечения катарсиса и создания ощущения власти над стихиями природы необходимо, чтобы игра на 20–30% состояла из тактико-силовых механик, которые не связаны с причинением прямого урона врагам, а значит, не будут провоцировать агрессию у детей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное эмпирическое исследование, основанное на сочетании методов карточной сортировки и ассоциативного анализа, было направлено на получение данных о восприятии детской аудиторией механик боевой системы новой RPG-игры. В ходе онлайн-сессий с детьми-респондентами были собраны и проанализированы как количественные показатели (матрица сходства механик, рейтинг предпочтений), так и качественные характеристики (эмоциональные реакции, ассоциации, архетипические образы), которые позволили верифицировать и внести следующие корректировки в проектные решения гейм-дизайнера.

1. Выбор в качестве основы для реализации безнасильственной боевой системы детской RPG-игры механик, направленных на ограничение действий врага без его силового уничтожения (70–80%). Так, механика «Ледяная клетка», которая получила наивысший ранг в рейтинге предпочтений, является ориентиром для визуального и содержательного воплощения «красивой остановки» врага.

2. Проектирование комбо-системы, в которой одна тактическая механика логически подготавливает или усиливает действие другой (например, замедление движения врага с последующей его остановкой).

3. Внедрение системы контрприемов на основе антагонистических механик, имеющих низкий коэффициент сходства. Такие механики могут быть использованы для создания ситуаций этического выбора или прямого противодействия, когда тактическая защита (например, «Электробарьер») позволяет детской аудитории нивелировать эффективность силовой атаки («Острая сосулька»).

4. Усиление эмоционального воздействия через выявленные ассоциативные образы: при проектировании механик боевой системы для новой видеоигры необходимо опираться на устойчивые ассоциации детей-респондентов.

5. Минимизация или содержательная трансформация «скучных» силовых механик: они должны быть переосмыслены, например, путем добавления тактического контекста (взаимодействие с окружением, нелетальные исходы и пр.) либо заменены на альтернативные тактико-силовые механики, которые обеспечивают обезвреживание врага без причинения ему прямого вреда.

6. Обеспечение баланса между тактическим контролем и игровым катарсисом: для сохранения у детской аудитории в рамках безнасильственного взаимодействия ощущения «власти над стихиями» и достижения эмоциональной разрядки рекомендуется включить в боевую систему 20–30% тактико-силовых механик.

Таким образом, цель исследования, состоявшая в получении эмпирических данных, которые необходимы для определения баланса между механиками тактического контроля и силового воздействия в боевой системе детской RPG-игры, достигнута. Выдвинутая гипотеза о приоритетности для детей механик, основанных на «умных» тактических взаимодействиях, подтверждена.

Методология исследования, примененная на этапе проектирования новой видеоигры, продемонстрировала свою эффективность для выявления когнитивных и эмоциональных паттернов у детской аудитории. Она может быть использована для решения аналогичных исследовательских задач, а сформированный перечень рекомендаций по проектированию безнасильственной боевой системы – адаптирован для создания детских видеоигр.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Martinez L., Gimenes M., Lambert E.* Video games and board games: Effects of playing practice on cognition // PLoS ONE. 2023. Vol. 18, No. 5. e0283654.
2. *Pallavicini F., Ferrari A., Mantovani F.* Video Games for Well-Being: A Systematic Review on the Application of Computer Games for Cognitive and Emotional Training in the Adult Population // Front. Psychol. 2018. Vol. 9. P. 2127.

3. *Sattar S., Iqbal Y., Yousaf R.* Impact of Playing Video Games on Cognitive Functioning and Learning Styles of Adolescents // *Sukkur IBA Journal of Computing and Mathematical Sciences*. 2021. Vol. 5, No. 2. P. 49–59.
4. *Villani D., Carissoli C., Triberti S., Marchetti A., Confalonieri E., Riva G.* Video games, emotion and emotion regulation: expanding the scope // *Annals of the International Communication Association*. 2018. Vol. 42, No. 2. P. 125–143.
5. *Ali N., Tajuddin S., Bramantoro A.* Classification of Game Mechanics: A Brief Review // *Proceedings of the 4th International Conference on Advances in Computational Science and Engineering. ICACSE 2023. Lecture Notes in Electrical Engineering*, Vol. 1199. Singapore: Springer, 2024. P. 313329.
6. *Wang D.* Analysis of Key Mechanics for The Impact of Game Design on Player Experience // *Transactions on Computer Science and Intelligent Systems Research*. 2025. Vol. 9. P. 331–336.
7. *Cassidy B., Antani D., Read J.* Using an open card sort with children to categorize games in a mobile phone application store // *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '13)*. New York: ACM, 2013. P. 2287–2290.
8. *Russell J., Bullock M.* Multidimensional Scaling of Emotional Facial Expressions: Similarity from Preschoolers to Adults // *Journal of Personality and Social Psychology*. 1985. Vol. 48, No. 5. P. 1290–1298.
9. *Миронова Н.И.* Ассоциативный эксперимент: методы анализа данных и анализ на основе универсальной схемы // *Вопросы психолингвистики*. 2011. №14. С. 108–119.

DESIGNING A NON-VIOLENT COMBAT SYSTEM FOR A CHILDREN'S RPG GAME

A. A. Kutuzov¹ [0009-0004-6652-2968], M. V. Shmatko² [0000-0002-7255-8885]

^{1,2}*Omsk State Technical University; Omsk, Russia*

¹kutuzovschool@mail.ru, ²marin298@gmail.com

Abstract

The article addresses the issue of designing a non-violent combat system for a children's RPG game. It presents the results of an empirical research. Its purpose is to obtain data to determine the balance between tactical control and direct damage mechanics.

The scientific novelty of the study lies in the empirical identification of the structure of perception by children aged 6–12 of various types of game mechanics: tactical (indirect impact on the enemy), tactical-force (neutralization without direct damage), and force (direct damage). Based on a combination of card sorting and associative analysis methods, a matrix of similarity of mechanics reflecting their categorization in children's minds was constructed, and stable emotional reactions and associations of children regarding key elements of the combat system (ice – control, wind – humor, electricity – ingenuity, fire – danger, etc.) were identified.

As a result of the study, three clusters of mechanics were identified (“Turn Skip,” “Weakening and Restriction,” “Direct Damage”) and a preference rating was compiled, in which tactical mechanics took the leading positions, while force (direct damage) mechanics were not a priority and were described by children as boring. Thus, the hypothesis regarding the preferences of the children's audience was fully confirmed: the core of a safe combat system should consist of non-violent tactical mechanics (70-80%) that ensure the intellectual engagement of players, combined with tactical-force mechanics aimed at their emotional release.

The practical significance of the study is determined by the possibility of applying the developed recommendations in the design of children's video games, as well as the adaptation of the proposed methodology for similar studies.

Keywords: *video game, non-violent combat system, children's video game, role-playing game, tactical mechanics, force mechanics, tactical-force mechanics, card sorting, associative analysis, game design, empirical research, game balance.*

REFERENCES

1. *Martinez L., Gimenes M., Lambert E.* Video games and board games: Effects of playing practice on cognition // PLoS ONE. 2023. Vol. 18, No. 5. e0283654.
2. *Pallavicini F., Ferrari A., Mantovani F.* Video Games for Well-Being: A Systematic Review on the Application of Computer Games for Cognitive and Emotional Training in the Adult Population // Front. Psychol. 2018. Vol. 9. P. 2127.
3. *Sattar S., Iqbal Y., Yousaf R.* Impact of Playing Video Games on Cognitive Functioning and Learning Styles of Adolescents // Sukkur IBA Journal of Computing and Mathematical Sciences. 2021. Vol. 5, No. 2. P. 49–59.
4. *Villani D., Carissoli C., Triberti S., Marchetti A., Confalonieri E., Riva G.* Video games, emotion and emotion regulation: expanding the scope // Annals of the International Communication Association. 2018. Vol. 42, No. 2. P. 125–143.
5. *Ali N., Tajuddin S., Bramantoro A.* Classification of Game Mechanics: A Brief Review // Proceedings of the 4th International Conference on Advances in Computational Science and Engineering. ICACSE 2023. Lecture Notes in Electrical Engineering, Vol. 1199. Singapore: Springer, 2024. P. 313329.
6. *Wang D.* Analysis of Key Mechanics for The Impact of Game Design on Player Experience // Transactions on Computer Science and Intelligent Systems Research. 2025. Vol. 9. P. 331–336.
7. *Cassidy B., Antani D., Read J.* Using an open card sort with children to categorize games in a mobile phone application store // Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '13). New York: ACM, 2013. P. 2287–2290.
8. *Russell J., Bullock M.* Multidimensional Scaling of Emotional Facial Expressions: Similarity from Preschoolers to Adults // Journal of Personality and Social Psychology. 1985. Vol. 48, No. 5. P. 1290–1298.
9. *Mironova N.I.* Associativnyj jeksperiment: metody analiza dannyh i analiz na osnove universalnoj shemy // Voprosy psiholingvistiki. 2011. No. 14. P. 108–119.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



КУТУЗОВ Андрей Андреевич – студент ОмГТУ, направление 09.03.02 «Информационные системы и технологии» (профиль – «Цифровые медиатехнологии, виртуальная и дополненная реальность»). Генеральный директор и гейм-дизайнер ООО «ИГРЫ ДЕЛАЮТ». Сфера научных интересов — разработка видеоигр, гейм-дизайн, игровая сценаристика.

Andrey Andreevich KUTUZOV – student at the Omsk State Technical University, majoring in 09.03.02 “Information Systems and Technologies” (specialization: “Digital Media Technologies, Virtual and Augmented Reality”). CEO and Game Designer at “IGRY DELAYUT” company. Research interests: video game development, game design, and game narrative design.

email: kutuzovschool@mail.ru

ORCID: 0009-0004-6652-2968



ШМАТКО Марианна Владимировна – к. филос. н, доцент кафедры «Математические методы и информационные технологии в экономике» ОмГТУ. Сфера научных интересов – гейм-дизайн, UX-аналитика и юзабилити информационных систем. Сфера практической деятельности – цифровой маркетинг.

Marianna Vladimirovna SHMATKO – Candidate of Philosophical Sciences, associate professor at the Department Mathematical Methods and Information Technologies in Economics, Omsk State Technical University. Research interests: game design, UX analytics and usability of information systems. Practical activities: digital marketing.

email: marin298@gmail.com

ORCID: 0000-0002-7255-8885

Материал поступил в редакцию 23 апреля 2026 года

ПРИМЕНЕНИЕ РУЧНОГО РЕДАКТОРА И ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКОГО ПАРСЕРА ИСХОДНЫХ ТЕКСТОВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ КОРПУСА ИГРОВЫХ СЦЕНАРИЕВ

Н. Р. Нурлыгаянов^[0000-0002-7969-0221]

Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

nikita25@mail.ru

Аннотация

Предложен практический подход к формированию специализированного корпуса игровых сценариев на основе сочетания ручной разметки и полуавтоматического парсинга исходных текстов. Метод объединяет графический редактор для экспертной разметки, модульный парсер, выполняющий первичную структуризацию исходных текстов на основе формальных правил и эвристик, а также визуализацию связей между сценами. Такое сочетание обеспечивает итеративный цикл экспертной валидации, необходимый для получения корректного и воспроизводимого корпуса.

Ключевые слова: NLP, разработка видеоигр, парсинг, валидация, визуализация, игровые сценарии, корпус текстов.

ВВЕДЕНИЕ

Создание сюжета и диалогов – это один из самых трудоемких этапов разработки видеоигр. В нелинейных нарративах каждое ветвлениекратно увеличивает нагрузку на команду, а изменения на поздних стадиях влекут непропорционально высокие издержки на озвучивание и локализацию [1, 2]. Наиболее остро эти проблемы стоят в AAA¹ сюжетно-ориентированных играх с их максимальными требованиями к качеству [3].

¹ AAA (произносится как «трипл-эй») — неофициальный термин, используемый в игровой индустрии для обозначения игр с самыми высокими бюджетами разработки и маркетинга. Происхождение термина не имеет однозначного объяснения, но предполагается, что он возник по аналогии с системой оценки облигаций, где AAA обозначает наивысший рейтинг. В контексте видеоигр AAA указывает на наивысшее качество, масштаб и ожидаемый коммерческий успех проекта. AAA-игра характеризуется крупными инвестициями, франшизами, включающими несколько

Современные игроки ожидают нелинейных нарративных структур, значительной вариативности последствий совершаемых действий, персонализированных и контекстно-зависимых диалогов [4–7].

Целью работы является создание воспроизводимого процесса и инструментария для преобразования разнородных исходных сценариев в стандартизированный корпус, пригодный для аналитики, обучения и интеграции с игровыми системами. Предложенный подход сочетает полуавтоматический парсинг (формальные правила и эвристики для первичной структуризации) с экспертной ручной разметкой в интерактивном редакторе. Итеративная валидация с применением графового анализа позволяет выявлять и исправлять логические несоответствия (циклы, дедлоки), обеспечивая высокое качество итогового корпуса при контролируемых затратах ручного труда.

В работе представлены концептуальная модель данных корпуса, архитектура разработанных приложений (ручной редактор и полуавтоматический парсер с веб-интерфейсом), методы визуализации и верификации диалоговых структур, а также рассмотрены ограничения предложенного подхода и направления его дальнейшего развития.

ИНДУСТРИАЛЬНАЯ ВОСТРЕБОВАННОСТЬ

Крупные студии инвестируют в решения на базе NLP и генеративного искусственного интеллекта (ИИ) для автоматизации создания текстов и облегчения работы сценаристов (например, платформы Microsoft × Inworld AI) [8–11].

Трансформеры применимы для генерации NPC²-реплик, но требуют адаптации под игровую лексику [12]. Учет контекста и предшествующих событий способен повысить качество сценариев и сократить ручную постобработку, однако существуют ограничения (сложности с долгосрочным контекстом), а для надежной интеграции таких подходов в производственный цикл необходимы организационные меры (гlossарии, отлаженные процессы локализации) [12, 13].

названий, множеством персонажей и длинными сюжетными линиями, а также большой базой поклонников.

² NPC (Non-playable character, неигровой персонажей) — персонаж компьютерной игры, управляемый программой, а не игроком. Выполняет нарративные (сюжетные, диалоговые), и/или процедуральные функции (торговля, выдача заданий), выступая элементом игрового мира и средством коммуникации с ним.

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ КОРПУСОВ ТЕКСТОВ ВИДЕОИГР

Общие текстовые корпуса (Google Ngram, Wikipedia Dumps) не отражают специфику игровых сценариев: ситуативные реплики, игровой сленг и авторскую терминологию. Для анализа нарративов требуются специализированные корпуса, учитывающие мультимодальность³, связь с игровой логикой и динамический контент (квесты, диалоги) [14–17].

Ранее было предложено создание отдельного корпуса для каждой игры [18]. Примером альтернативного подхода служит проект Video Game Dialogue Corpus, агрегирующий данные из RPG для создания унифицированного лингвистического ресурса [19] (рис. 1).

Специализированный игровой корпус — это целенаправленно составленное и аннотированное собрание текстов из конкретных игр или серий. Он служит референсной базой для анализа нарративных решений, жанровой лексики и принципов построения диалогов [18]. Кроме того, такие корпуса используют для обучения моделей генерации естественного языка (NLG), обеспечивая дообучение алгоритмов для автоматизированного прототипирования диалогов и текстовых описаний.

Таким образом, специализированные корпуса способствуют оптимизации процесса разработки сценариев, предоставляя структурированные данные для последующего анализа и автоматизации.

Корпусы используют для обучения языковых моделей с целью генерации правдоподобного игрового контента [20]. Большие языковые модели (Large Language Models, LLM) позволяют осуществлять синтез фонового текста, описаний предметов и сценарных ветвей на основе соответствующих обучающих выборок из специализированных корпусов. Это создает потенциал для оперативного наполнения игровых сред дополнительным контентом с применением методов машинного обучения (Machine Learning, ML). Ключевым ограничивающим фактором в данном случае является качество исходного корпуса: чем выше его адекватность и репрезентативность, тем больше результаты синтеза контента соответствуют ожидаемым характеристикам.

³ Под мультимодальностью игрового текста понимается его свойство существовать не изолированно, а в неразрывной связи с анимацией, звуковым рядом и действиями игрока, где значение реплики или события рождается именно из их взаимодействия.

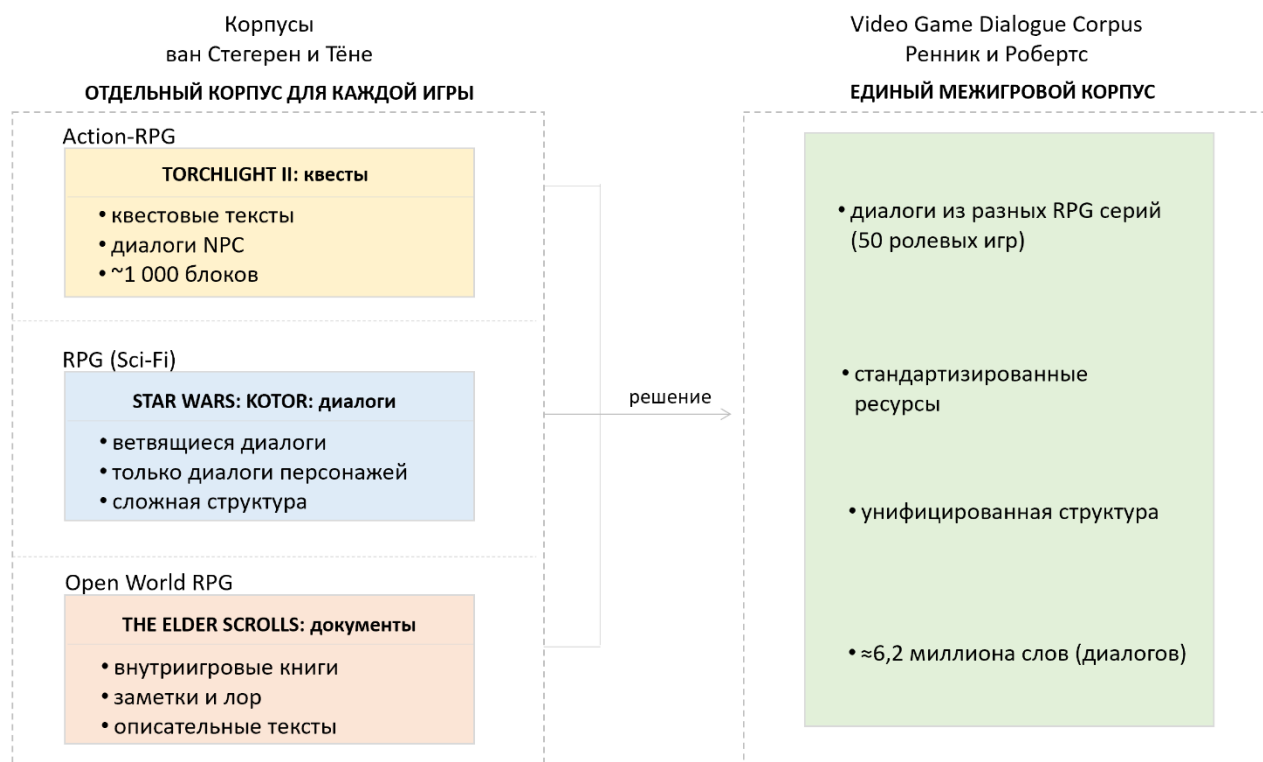


Рис. 1. Концепция унификации: от множества разнородных корпусов к единой структуре данных.

Специализированный корпус служит нормативным референс-ресурсом для сценаристов, обеспечивая стилистическую консистентность и жанровую специфику. В студийном производстве он сокращает адаптацию новых авторов и используется для контроля качества, включая верификацию терминологии. Генеративные модели, обученные на корпусе, способны создавать нарративные прототипы, инициируя авторскую разработку [21, 22].

Корпусы также применяют в локализации и персонализации контента: на их основе генерируют адаптивные ответы NPC и сценарии, учитывающие характеристики персонажей и контекст взаимодействия с игроком [4, 23–29]. Таким образом, специализированные игровые корпуса выступают эталоном для лингвистического обеспечения локализации, адаптивной генерации нарратива и оптимизации разработки.

Игровые тексты имеют сложную структуру: ветвящиеся диалоговые деревья, метки событий, индикаторы состояний, эмоциональную окраску и пара-

метры озвучки. Корпус должен объединять нарративные, описательные и интерфейсные данные, а также учитывать высокую концентрацию неологизмов и вымышленных имен [30].

Основная методологическая проблема заключается в ограниченности и неоднородности доступных корпусных данных, она связана со сложностью сбора, разработкой под конкретные задачи и отсутствием единых стандартов хранения и аннотации. Это затрудняет сравнительный анализ и вынуждает исследователей каждый раз собирать данные заново [18]. Для преодоления этих проблем Ван Стегерен и Тене предложили критерии качества корпусов, которые учтены в настоящей работе. Формирование корпусов игровых текстов опирается на два типа источников [18]: прямое извлечение из файлов игры (репрезентативно, сохраняет контекст, но технически сложно и юридически рискованно) и фанатские ресурсы (доступны в переносимых форматах, но уступают в полноте контекста и требуют верификации).

Типовая процедура извлечения текстов из видеоигр (рис. 2) требует обязательного документирования каждого этапа (используемые утилиты, параметры, ограничения) для обеспечения воспроизводимости результата. В целях повышения научной ценности итоговый корпус должен включать для каждой текстовой единицы комплекс метаданных, фиксирующих ее внутриигровой контекст.

Для структурирования извлеченных знаний применяются онтологии — формальные модели предметной области, описывающие концепты, их свойства и взаимосвязи [31]. Процесс разработки онтологии итеративен и включает пять этапов [32] (рис. 3).

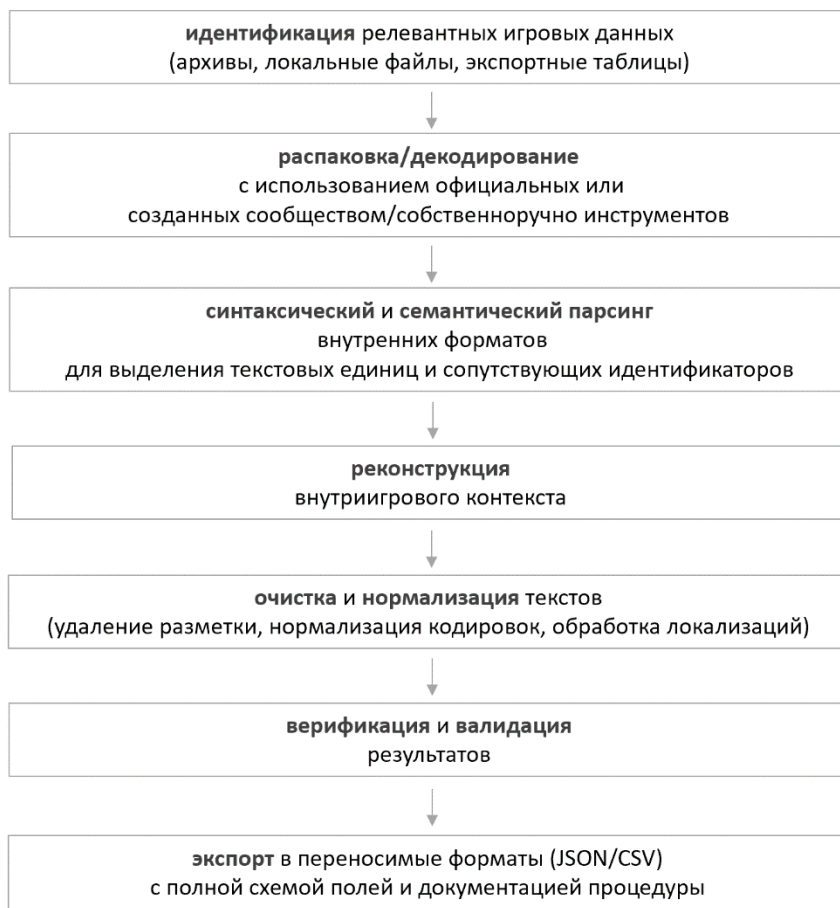


Рис. 2. Типовой процесс извлечения текстовых данных из видеоигр.



Рис. 3. Этапы создания онтологии.

Альтернативой онтологическому моделированию служит ручная разметка данных, однако этот подход, как отмечено в [33], является ресурсоемким, трудномасштабируемым и зависит от экспертов. Краудсорсинг⁴ снижает затраты, но порождает проблему вариативного качества аннотаций, особенно в сложных предметных областях с контекстными зависимостями. В связи с этим для построения корпусов игровых сценариев мы предлагаем отказаться от стратегии полной ручной аннотации в пользу воспроизводимого программного конвейера, который комбинирует формальные правила, эвристики и итеративную валидацию. Такой подход, демонстрирующий эффективность в ряде исследований [34–36], позволяет достичь оптимального баланса между качеством данных и трудозатратами на их подготовку.

ПРЕДЛАГАЕМЫЙ ПОДХОД

Для преодоления существующего ограничения возможно использование предложенной ранее модели [37], в которой сценарий трактуется как упорядоченный набор диалогов. Ранее в модели использовался один, основной файл в формате JSON, содержащий структурированные данные, представляющие диалоговую систему. Каждая запись в нем описывает отдельную реплику.

В настоящей работе модель расширена вторым, вспомогательным файлом (рис. 4) в формате JSON, предназначенным для хранения метаданных персонажей. Его структура включает поле `speaker` (идентификатор персонажа, согласованный с основным файлом) и поле `aliases`, представляющее собой список псевдонимов, используемых для данного персонажа в сценарии. Разделение на два файла обеспечивает компактность основного хранилища и гибкость при загрузке метаданных.

```
"26": [  
  "Oracle",  
  "The Witch"  
],
```

Рис. 4. Пример записи из дополнительного файла.

⁴ Краудсорсинг – привлечение широкого круга неспециалистов через онлайн-платформы для выполнения задач по сбору или разметке данных.

Предложенная модель данных открывает возможности для различных практических применений, часть из которых будет рассмотрена далее. Преобразование исходных сценариев в JSON можно осуществлять вручную, но предлагается использовать специально разработанные инструменты, обеспечивающие частичную или полную автоматизацию. Их использование позволит построить интерактивную визуализацию для многоаспектного анализа.

После загрузки данных в веб-браузере пользователь получает доступ к графовым представлениям. Основным является общий граф, где вершины соответствуют диалогам (наборам реплик с общим `id_dialogue`), а ребра – связям между диалогами. Направленные связи формируются на основе анализа полей `requires` и `opens`. Если хотя бы одна реплика диалога *A* ссылается хотя бы на одну реплику диалога *B* в поле `requires`, между вершинами устанавливается отношение зависимости. Если реплика в диалоге *A* содержит реплику диалога *B* в поле `opens`, создается связь, означающая активацию целевого диалога. Эти типы отношений визуально дифференцируются. Изолированные вершины (не имеющие связей) маркируются отдельным цветом, сигнализируя о возможных структурных проблемах.

Система автоматически детектирует циклы в графе, выделяя потенциально проблемные последовательности вида диалог *A* → ... → диалог *B*. Такие конструкции, указывающие на возможное сюжетное заикливание, визуально маркируются. Их наличие свидетельствует о нарушении прогрессии состояния в сценарии и представляет особую проблему для нелинейных нарративов с множеством ветвлений, где ручная верификация затруднена. Инструмент не только визуализирует циклические зависимости, но и делает доступными стратегии коррекции: модификацию полей `requires/opens`, введение промежуточных состояний или реструктуризацию нарративной ветви. Аналогичным образом при работе с графом отдельного диалога (вершины — реплики) проводится детекция локальных циклов: алгоритм проверяет, не образуют ли переходы внутри диалога ссылки на уже пройденные вершины, блокирующие развитие сцены. Данный подход обеспечивает двухуровневый контроль целостности сценария – на уровне общей сюжетной структуры и уровне отдельных диалоговых последовательностей.

Помимо циклических зависимостей модель обеспечивает формальную верификацию сценариев на наличие критических тупиковых ситуаций – дедлоков (deadlocks). В контексте нарративного дизайна дедлок определяется как взаимная блокировка, при которой прогресс в диалоге *A* обусловлен выполнением условия, активируемого диалогом *B*, в то время как для доступа к диалогу *B* необходимо условие из диалога *A*. Эта взаимообусловленность создает логический тупик, блокирующий дальнейшее развитие сюжета.

Детекция дедлоков осуществляется через анализ графа условных зависимостей, построенного на основе атрибутов *requires* и *opens* для каждого диалога. Простейшим примером является конфигурация:

- диалог *A*: {"requires": ["flag_X"], "opens": ["flag_Y"]};
- диалог *B*: {"requires": ["flag_Y"], "opens": ["flag_X"]},

где возникает классическая взаимная блокировка: активация *flag_X*, требуемого в диалоге *A*, возможна только в диалоге *B*, который, в свою очередь, требует предварительной активации *flag_Y*, устанавливаемого исключительно в диалоге *A*.

Для автоматического обнаружения взаимных блокировок (дедлоков) граф анализируется на наличие компонент сильной связности⁵ (применяется алгоритм Тарьяна [38]), которые визуально маркируются в интерфейсе как проблемные зоны.

Предложенная модель формирует методологическую основу для создания стандартизированного корпуса игровых сценариев, обеспечивающего интеграцию разнородных нарративных данных в единую структурированную базу. Формирование корпуса осуществляется в несколько этапов.

Начальный этап включает сбор исходных текстовых сценариев из игр различных жанров с обязательным соблюдением установленных критериев репрезентативности и качества.

⁵ Компонента сильной связности — это максимальное подмножество вершин ориентированного графа, в котором для любой пары вершин *U* и *V* существует ориентированный путь из *U* в *V* и из *V* в *U* (т. е. вершины взаимно достижимы). Каждая вершина графа принадлежит ровно одной такой компоненте.

Этап конвертации заключается в автоматизированном парсинге исходных данных с помощью специализированного инструментария. Данные трансформируются в соответствии с унифицированной JSON-схемой (основной и вспомогательный файлы). Применение алгоритмов полуавтоматического парсинга позволяет выполнить первичную структуризацию диалогов и сформировать унифицированное представление сценария. Идентификация диалоговых ветвлений, условий активации и спикеров в неоднозначных случаях предполагает последующую экспертную корректировку в интерактивном интерфейсе.

Этап валидации и семантической аннотации выполняется посредством интерактивной системы. Используя общий граф и графы отдельных диалогов, исследователь может выявлять и корректировать структурные аномалии (например, изолированные диалоги или некорректные условные связи) и семантические несоответствия, включая резкие изменения тональности в эмоциональных арках персонажей. Веб-интерфейс системы предоставляет возможность прямого редактирования с последующим экспортом исправленных данных.

На этапе агрегации JSON-файлы, прошедшие валидацию, объединяются в единый репозиторий. Практическая ценность созданного корпуса заключается в его применении для обучения предметно-ориентированных NLP-моделей (например, тонкой настройки GPT для генерации игровых диалогов), проведения сравнительного анализа жанровых нарративных паттернов и интеграции с системами процедурной генерации контента (PCG) для автоматизированного прототипирования игр.

ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Ручной редактор

Ручной редактор [39] реализован на C# с использованием WPF и предназначен для ручной обработки сценариев в соответствии с предложенной моделью. Инструмент позволяет формировать оба используемых JSON-файла и постепенно заполнять их, не требуя одновременного открытия внешних редакторов.

Приложение предназначено для двух основных сценариев применения: целенаправленной ручной аннотации для получения эталонных основной и вспомогательной разметок (полезно для настройки алгоритмов парсинга или по-

следующей визуализации) и создания эталонных наборов данных в случаях, когда автоматические алгоритмы (например, используемые в *полуавтоматическом парсере исходных текстов*) дают неудовлетворительный результат, что может потребовать дообучения.

Полуавтоматический парсер исходных текстов

Полуавтоматический парсер исходных текстов [40] реализован на Python и JavaScript с использованием библиотеки Pyvis (визуализация на базе VisJS) [41] и предназначен для автоматизации полного цикла обработки текстовых игровых сценариев: от парсинга исходного файла до генерации структурированных JSON-данных и их интерактивной веб-визуализации.

Приложение разделено на два компонента: модуль парсинга и генерации JSON (Python) и веб-интерфейс визуализации и правки данных (HTML/JS, VisJS через Pyvis).

Пользователю доступны три предобученные модели:

- 1) DistilBERT [42] — облегченная версия BERT, обеспечивающая быстрый вывод при умеренной точности; целесообразна для использования при ограниченных вычислительных ресурсах;
- 2) Twitter-XLM-Roberta [43] — XLM-Roberta-base, дообученная на корпусе твитов; эффективна для анализа неформального языка, сленга и эмоционально окрашенных текстов;
- 3) BERT Multilingual [44] — модель, предобученная на 104 языках; подходит для единообразного анализа в мультязычных корпусах без развертывания отдельных моделей.

Пользователь может пропустить шаг парсинга в интерфейсе и загрузить уже готовые JSON-файлы (например, созданные с помощью *ручного редактора*).

Общий граф визуализирует диалоги как узлы. На каждом узле отображаются id_dialogue и число реплик.

Узлы кодируются по наличию связей; изолированные узлы и циклы помечаются для ручной проверки. Система автоматически детектирует циклы и дед-

локи, подсвечивая вовлеченные узлы и ребра. Пользователю доступны получение пояснений о проблемных элементах (например, список записей, образующих цикл) и способы разрешения (например, ручное связывание).

Для изучения и редактирования доступны графы конкретных диалогов.

Объединённый граф сформирован по выбранным спикерам: диалоги, в которых участвуют все выбранные персонажи, объединяются в общий представительный граф.

Инструмент позволяет построить динамику тональности для визуализации эмоциональных арок. Для каждого диалога рассчитывается среднее значение тональности по всем репликам спикера.

При запуске веб-приложение автоматически уведомляет о найденных циклах (если они обнаружены) и позволяет перейти к проблемным участкам для их устранения.

Таким образом, *полуавтоматический парсер исходных текстов* обеспечивает полный цикл работы со сценарием: генерацию JSON по предложенной структуре, интерактивный анализ, визуальную диагностику структурных проблем и экспорт скорректированных данных. Приложение может использоваться как совместно с *ручным редактором* для подготовки корпусных данных, так и автономно для формирования и коррекции разметки, применяемой в дальнейших исследованиях и процедурах автоматической генерации прототипов игр.

НАПРАВЛЕНИЯ ДОРАБОТКИ РАЗРАБОТАННЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ

Разработанный инструментарий обеспечивает структурированный анализ игровых нарративов, позволяя выявлять ошибки в эмоциональной динамике, оценивать баланс ролей персонажей и готовить данные для систем диалогового ИИ. В целях дальнейшего повышения универсальности, надежности и масштабируемости системы выделен ряд перспективных направлений для доработки.

Экспериментальные результаты и ограничения

Анализ эмоциональной окраски. Использование моделей-трансформеров позволило получить гибкое и контекстуально-зависимое представление о динамике эмоций. Возможность переключения между моделями в *полуавтомати-*

ческом парсере исходных текстов позволяет выявлять расхождения в интерпретациях, строить динамику тональности на графах диалогов и фиксировать эмоциональные пики сюжета.

Эксперименты показали, что ни одна из универсальных моделей не демонстрирует стабильно корректных результатов «из коробки» для всего многообразия игровых текстов. Это обусловлено следующими факторами:

- 1) уникальная лексика: вымышленные имена, топонимы, термины вселенной (например, «драконорождённый», «каджит» в случае *The Elder Scrolls V: Skyrim*) отсутствуют в стандартных обучающих корпусах, что приводит к некорректной токенизации и потере смысла;
- 2) сложный контекст: реплики NPC часто зависят от внутриигровых событий, выбора игрока или скрытых параметров, что выходит за рамки семантики отдельного предложения;
- 3) жанровая вариативность: стилистика диалогов в фэнтези-RPG, научной фантастике или постапокалипсисе кардинально различается, что снижает эффективность единой модели;
- 4) структурная сложность: ветвящиеся диалоги с условиями требуют понимания не только текста, но и логики переходов между репликами.

Как следствие, универсальные модели часто фрагментируют игровую лексику, неверно интерпретируют внутриигровые роли (например, антагонист или союзник) и демонстрируют низкую точность в задачах классификации.

Для преодоления этих ограничений необходима адаптация моделей. В перспективе можно рассмотреть два подхода: дообучение модели на корпусе конкретной игры, что позволит ей усвоить специфическую лексику и нарративные паттерны, и тонкая настройка, адаптирующая лишь часть параметров под сеттинг без потери общих лингвистических знаний.

Ограничения локальных LLM для автоматизации. Для гарантии целостности и воспроизводимости корпуса первичное преобразование сырого текста в JSON-структуру выполняется детерминированными парсерами. Это исключает неконтролируемые вариации, свойственные LLM. Сами языковые модели задействуются на поздних стадиях — при анализе тональности. Кроме того, в будущем

возможно их применение для задач, где допустима и даже желательна креативность: написание вариантов реплик, обогащение текста комментариями, адаптация под стиль персонажа.

Сравнение результатов применения программного комплекса для игр с линейным и нелинейным сценарием. Для валидации предложенного подхода и демонстрации возможностей разработанного инструментария было проведено сравнение двух сценариев, радикально различающихся по своей структуре: линейный сценарий коммерческой игры *Assassin's Creed: Bloodlines* (рис. 5) и нелинейный, ветвящийся сценарий авторской игры *Empty Life* (рис. 6).



Рис. 5. Фрагмент общего графа *Assassin's Creed: Bloodlines*.

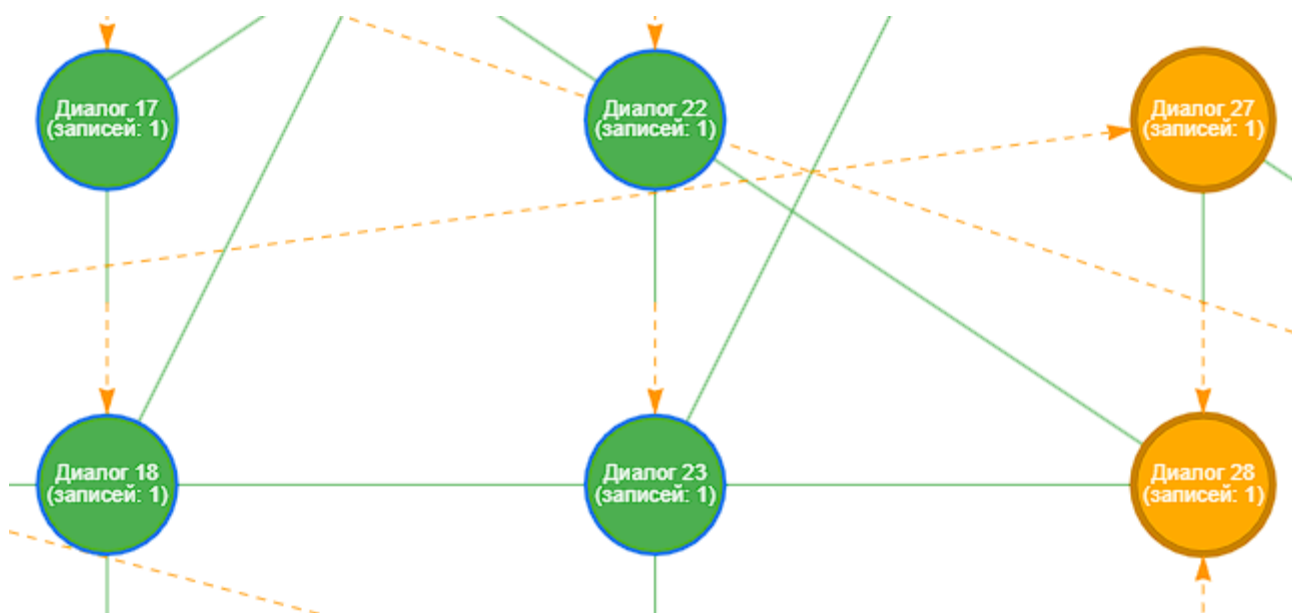


Рис. 6. Фрагмент общего графа *Empty Life*. Оранжевые узлы относятся к одному циклу.

На рис. 5–6 приведены узлы общих графов, где каждый узел представляет собой диалог. Число записей в диалоге — это число реплик.

Первый сценарий был преобразован в унифицированный JSON-формат с использованием одного из алгоритмов, встроенных в *полуавтоматический парсер исходных текстов*. Второй сценарий сформирован при помощи связи *ручного редактора* и *полуавтоматического парсера исходных текстов*.

На основе полученных данных построены графы диалоговых структур и рассчитан ряд количественных метрик, позволяющих объективно оценить сложность нарратива.

Метрики анализа. Для сравнения были использованы следующие характеристики:

- общее количество диалогов (уникальных id_dialogue) и реплик (записей);
- средняя длина диалога (реплик на диалог);
- количество узлов ветвления (диалогов, у которых поле opens содержит более одного идентификатора);
- количество точек схождения (диалогов, на которые ссылаются более одного другого диалога в поле requires);
- наличие циклов;

- плотность графа (отношение числа ребер-связей к числу узлов-диалогов).

Как видно из результатов количественного анализа (табл. 1), сценарий *Assassin's Creed: Bloodlines* представляет собой классическую линейную последовательность. Все 26 диалогов выстроены в цепочку, где каждый последующий диалог открывается только после завершения предыдущего. Отсутствие узлов ветвления и точек схождения подтверждает, что у игрока нет возможности влиять на развитие сюжета. Граф сценария является простым путем, а единственный терминальный узел соответствует финальной сцене игры. Плотность графа близка к минимальной, что характерно для строго последовательных нарративов. Инструментарий в данном случае выполняет прежде всего функцию структурирования и визуализации, позволяя быстро убедиться в отсутствии логических ошибок (циклов, «мертвых» веток).

Табл. 1. Сравнительные метрики сценариев *Assassin's Creed: Bloodlines* и *Empty Life*.

Метрика	Assassin's Creed: Bloodlines	Empty Life
Общее количество диалогов	26	34
Общее количество реплик	443	34
Средняя длина диалога	17	1
Узлы ветвления	0	31 (91 % от всех диалогов)
Точки схождения	0	15 (44 % от всех диалогов)
Наличие циклов	нет	да (обнаружен 1 цикл)
Терминальные узлы (концовки)	1 (финальная реплика)	11 (32 % от всех диалогов)
Плотность графа	0,04 (линейная цепь)	0,21 (высокая связность)

Сценарий *Empty Life* демонстрирует принципиально иную, нелинейную структуру. При сопоставимом общем количестве диалогов (34 против 26) средняя длина диалога составляет всего одну реплику, что указывает на высокую степень декомпозиции нарратива: каждое игровое состояние представлено отдельным диалогом-вершиной. Более 90 % диалогов являются узлами ветвления, предоставляя игроку выбор из двух или более вариантов продолжения. Наличие 15 точек схождения (диалогов, к которым можно прийти различными путями) свидетельствует о конвергенции сюжетных линий. Относительно высокая плотность графа (0/21) отражает более сложную сеть взаимосвязей между состояниями.

Наиболее важным результатом применения инструментария к *Empty Life* стала автоматическая детекция цикла в графе зависимостей. Такая структура означает, что игрок теоретически может бесконечно перемещаться по данному кольцу, не достигая концовки. В контексте авторского замысла это может быть как преднамеренным художественным приемом (симуляция «замкнутого круга» в жизни персонажа), так и ошибкой проектирования. Инструмент не только визуально маркирует подобные циклы, но и предоставляет разработчику полный список вовлеченных вершин для дальнейших анализа и коррекции.

Выполненное сравнение наглядно демонстрирует, что предложенный программный комплекс позволяет не просто визуализировать сценарий, но и проводить его объективный количественный анализ. Метрики, извлекаемые из унифицированного JSON-представления, дают четкую характеристику нарративной сложности: линейный сценарий описан минимальными значениями ветвлений и плотности, тогда как нелинейный характеризуется высокими показателями связности, наличием множества концовок и потенциально проблемных циклов.

Особую ценность представляет возможность автоматического обнаружения циклов и дедлоков. В линейном сценарии такие аномалии отсутствуют, и валидация сводится к проверке последовательности. В нелинейном же сценарии ручное выявление циклов крайне затруднительно, и автоматизированная диагностика становится незаменимым инструментом контроля качества, позволяя сценаристам и гейм-дизайнерам целенаправленно анализировать подозрительные участки нарратива.

Таким образом, разработанный инструментарий (рис. 7) успешно решает задачу анализа сценариев любого уровня сложности, предоставляя как наглядную визуализацию, так и строгие количественные метрики для оценки структурной целостности и выявления логических ошибок.

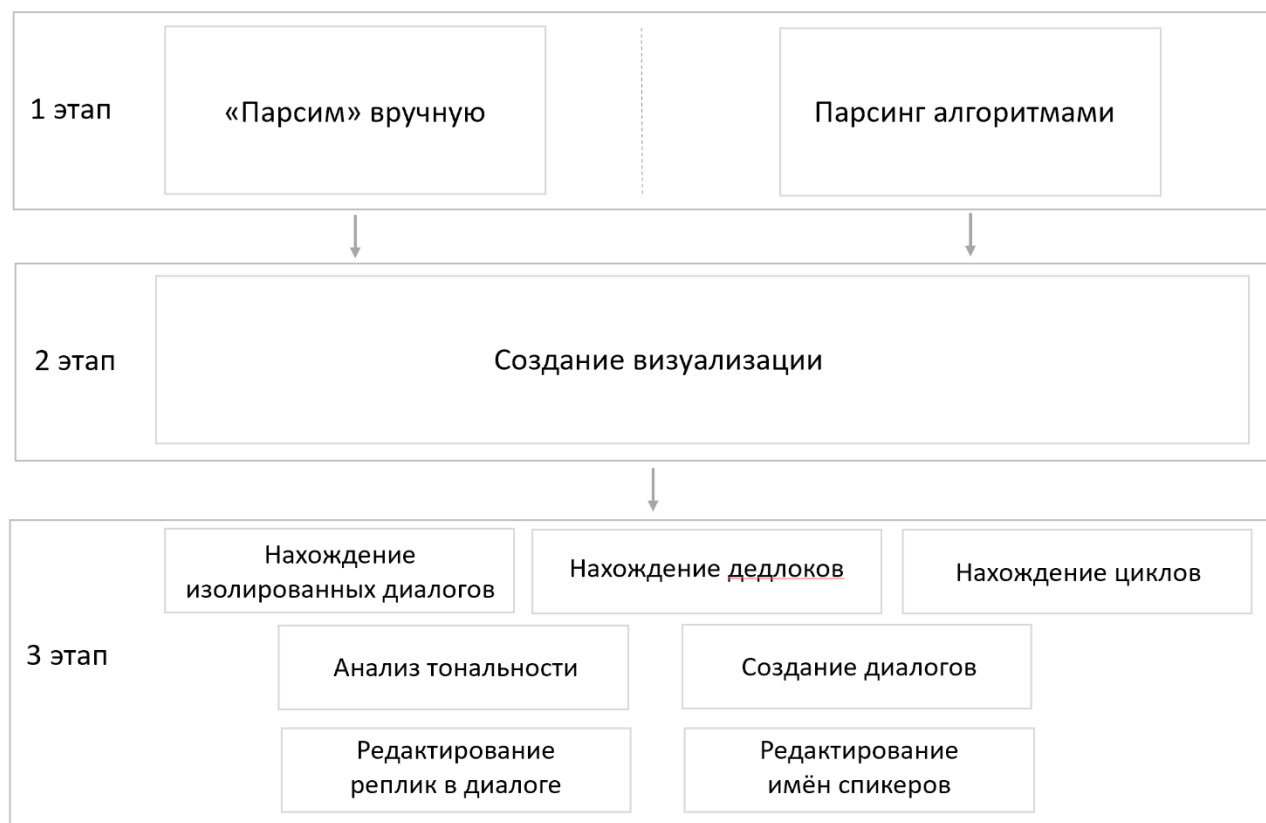


Рис. 7. Предлагаемая последовательность применения разработанного программного комплекса

Перспективные направления развития

На основе проведенного анализа были сформулированы следующие ключевые векторы развития инструментария:

- 1) повышение точности и устойчивости парсинга. Внедрение гибридного подхода, комбинирующего предобученные ML-модели для распознавания шаблонов и набор детерминированных правил для обработки нестандартных или поврежденных форматов данных;

- 2) расширение набора аналитических метрик;
- 3) анализ баланса и развития ролей. Разработка методов для количественной оценки значимости и экранного времени персонажей, оптимизации второстепенных ролей и трекинга развития нарративных арок ключевых героев;
- 4) сравнительный кросс-жанровый анализ. Применение инструментария к массивам сценариев из разных игр и жанров для выявления устойчивых паттернов (например, интересно сравнить сложность диалоговых деревьев в RPG с линейностью в экшн-играх) и оценки исторической эволюции приемов нарративного дизайна;
- 5) интеграция с системами разработки. Создание плагинов для экспорта структурированных данных и аналитических отчетов напрямую в популярные игровые движки (Unreal Engine, Unity).

Реализация указанных направлений позволит трансформировать *полуавтоматический парсер исходных текстов* в комплексную платформу для полного цикла работы с игровым нарративом – от анализа и верификации существующих сценариев до проектирования и интеграции новых, что существенно расширит его приложение как в академической сфере, так и в индустрии игр.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен комплексный программно-методический подход к формированию стандартизированного корпуса игровых сценариев, основанный на интеграции ручного редактора и полуавтоматического парсера исходных текстов. Разработанный инструментарий реализует концептуальную модель данных, впервые описанную в работе [40]. Данная модель позволяет формализовать нарративные конструкции, обеспечивая структурную целостность и логическую непротиворечивость игровых текстов.

Разработанный программный комплекс образует единый рабочий конвейер, поддерживающий полный цикл обработки сценариев: от первичного парсинга и разметки до визуализации, верификации и экспорта данных. Его применение позволяет эффективно сочетать точность экспертной ручной правки с производительностью автоматизированного анализа, что существенно снижает трудозатраты на подготовку корпусных данных.

Ключевыми практическими результатами работы являются:

- стандартизация представления игровых сценариев;
- автоматизированная валидация структурной целостности;
- контекстуальный анализ тональности и динамики диалогов.

Разработанный подход обладает значительным потенциалом для применения как в академических исследованиях (вычислительная лингвистика, анализ нарративов, кросс-жанровые сравнения), так и в индустрии разработки игр – для контроля качества сценариев, обучения диалоговых ИИ-систем, локализации и процедурной генерации контента.

Перспективные направления развития инструментария включают:

- повышение точности парсинга за счет гибридных ML-правил;
- интеграцию с игровыми движками (Unreal Engine, Unity);
- расширение аналитических метрик (сюжетная сложность, UX-метрики);
- поддержку динамических и персонализированных сценариев.

ЛУДОГРАФИЯ

Bethesda Game Studios. (2025) [2011.] *The Elder Scrolls V: Skyrim*. [видеоигра][загрузка][Windows, Xbox 360, PlayStation 3, Xbox One, PlayStation 4, Switch, Xbox Series X|S, PlayStation 5, Switch 2]. Bethesda Softworks.

Griptonite Games. (2009). *Assassin's Creed: Bloodlines*. [видеоигра][UMD, загрузка][PSP]. Ubisoft.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Engström H. Game Development Research. Skövde: University of Skövde, 2020, 242 p.
2. Oliver G. Renegade or Paragon?: Categorizing Narrative Choice in Video Game Storylines // Dialogue: The Interdisciplinary Journal of Popular Culture and Pedagogy. 2020. Vol. 7, Iss. 1. No. 9. P. 1-13.
3. Goh E., Al-Tabbaa O., Khan Z. Unravelling the complexity of the Video Game Industry: An integrative framework and future research directions // Telematics and Informatics Reports. 2023. Vol. 12. No. 100100. P. 1–18.

4. *Ashby T., Webb B. K., Knapp G., Searle J., Fulda N.* Personalized Quest and Dialogue Generation in Role-Playing Games: A Knowledge Graph- and Language Model-based Approach // Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '23). 2023. P. 1–20.
5. *Burgess J., Jones C.* Exploring Player Understandings of Historical Accuracy and Historical Authenticity in Video Games // Games and Culture: A Journal of Interactive Media. 2022. Vol. 17. Iss. 5. P. 816–835.
6. *Erb V., Lee S., Doh Y.Y.* Player-Character Relationship and Game Satisfaction in Narrative Game: Focus on Player Experience of Character Switch in The Last of Us Part II // Frontiers in Psychology. 2021. Vol. 12. No. 709926. P. 1–11.
7. *Zhang X., Huang Q., Shi Z., Zhang K.* How Cultural Elements Shape Game Evaluations: The Role of Cultural Authenticity and Perceived Effort // Computers in Human Behavior. 2024. Vol. 162. No. 108452.
8. *Inworld AI.* Xbox partners with Inworld AI to build generative AI tools for game development. URL: <https://inworld.ai/blog/xbox-partners-with-inworld-ai-to-build-generative-ai-tools-for-game-development>
9. Microsoft. Project Explora, powered by Inworld AI & Microsoft. URL: <https://developer.microsoft.com/en-us/games/products/project-explora/>.
10. *Klose T. Inworld AI.* Will Bring Generative AI to Microsoft Xbox Game Development. URL: <https://voicebot.ai/2023/11/13/inworld-ai-will-bring-generative-ai-to-microsoft-xbox-game-development/>
11. Microsoft. Xbox and Inworld AI partner to empower game creators with the potential of Generative AI. URL: <https://developer.microsoft.com/en-us/games/articles/2023/11/xbox-and-inworld-ai-partnership-announcement/>
12. *Huang J.* Generating Dynamic and Lifelike NPC Dialogs in Role-Playing Games Using Large Language Models. Lappeenranta: LUT University, 2024. 78 p.
13. IGDA Localization SIG. Best Practices for Game Localization. URL: <https://igda-website.s3.us-east-2.amazonaws.com/wp-content/uploads/2021/04/09142137/Best-Practices-for-Game-Localization-v22.pdf>
14. *Deterding S.* Contextual Autonomy Support in Video Game Play: A Grounded Theory // Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems New York: ACM, 2016. P. 3931–3943.

15. McEnery T., Hardie A. *Corpus Linguistics: Method, Theory and Practice* Cambridge: Cambridge University Press, 2011. 295 p.
16. Small S., Stromer-Galley J., Strzalkowski T. Multi-modal annotation of quest games in Second Life // *Proceedings of the 49th annual meeting of the association for computational linguistics: human language technologies*. 2011. P. 171–179.
17. Summerville A., Snodgrass S., Guzdial M., Holmgård C., Hoover A.K., Isaksen A., Nealen A., Togelius J. Procedural Content Generation via Machine Learning (PCGML) // *IEEE Transactions on Games*. 2018. Vol. 10, No. 3. P. 257–270.
18. van Stegeren J., Theune M. Fantastic strings and where to find them: The quest for high-quality video game text corpora // *12th Intelligent Narrative Technologies Workshop (INT 2020) CEUR*. 2021. P. 1–8.
19. Rennick S., Roberts S. The video game dialogue corpus // *Corpora*. 2024. Vol. 19, No. 1. P. 93–106.
20. van Stegeren J., Myśliwiec J. Fine-tuning GPT-2 on annotated RPG quests for NPC dialogue generation // *Proceedings of the 16th International Conference on the Foundations of Digital Games*. 2021. P. 1–8.
21. Kybartas B., Bidarra R. A survey on story generation techniques for authoring computational narratives // *IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games*. 2016. Vol. 9, No. 3. P. 239–253.
22. Riedl M.O., Young R.M. Narrative planning: Balancing plot and character // *Journal of Artificial Intelligence Research*. 2010. Vol. 39. P. 217–268.
23. Ginel M.R., Theroine S. Machine Translation and Gender Biases in Video Game Localisation: A Corpus-Based Analysis // *Journal of Data Mining & Digital Humanities*. 2022. P. 1–10.
24. Hansen D., Houlmont P.Y. A Snapshot into the Possibility of Video Game Machine Translation // *Proceedings of the 15th Biennial Conference of the Association for Machine Translation in the Americas (Volume 2: Users and Providers Track and Government Track)*. 2022. Vol. 3. P. 257–269.
25. How Developers Localize Game Characters' Names, Voices, and More: Facts & Finer Points. URL: <https://igda.org/resources-archive/how-developers-localize-game-characters-names-voices-and-more-facts-finer-points/>

26. *Nathan D.* Sound and Unsound Practices in Documentary Linguistics: Towards an Epistemology for Audio and Video Corpora // *Language Documentation and Description*. 2010. Vol. 7. P. 262–288.
27. *Pirrone M., D’Ulizia A.* The Localization of Software and Video Games: Current State and Future Perspectives // *Information*. 2024. Vol. 15. No. 10.
28. *Raja R., Vats A.* Parallel Corpora for Machine Translation in Low-Resource Indic Languages: A Comprehensive Review // *Proceedings of the Eighth Workshop on Technologies for Machine Translation of Low-Resource Languages (LoResMT 2025)*. 2025. P. 129–143.
29. *Liu X., Xie Z., Jiang S.* Personalized Non-Player Characters: A Framework for Character-Consistent Dialogue Generation // *AI*. 2025. Vol. 6. No. 5.
30. *Bergsma T., van Stegeren J., Theune M.* Creating a Sentiment Lexicon with Game-Specific Words for Analyzing NPC Dialogue in The Elder Scrolls V: Skyrim // *Workshop on Games and Natural Language Processing*. 2020. P. 1–9.
31. *Gruber T.R.* A Translation Approach to Portable Ontology Specifications // *Knowledge Acquisition*. 1993. Vol. 5, No. 2. P. 199–220.
32. *Noy N.F. et al.* Ontology Development 101: A Guide to Creating Your First Ontology. 2001. P. 1–28.
33. *Snow R. et al.* Cheap and Fast – But Is It Good? Evaluating Non-Expert Annotations for Natural Language Tasks // *Proceedings of the 2008 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing*. 2008. P. 254–263.
34. *Mintz M. et al.* Distant Supervision for Relation Extraction without Labeled Data // *Proceedings of the Joint Conference of the 47th Annual Meeting of the ACL and the 4th International Joint Conference on Natural Language Processing*. 2009. P. 1003–1011.
35. *Ratner A.J. et al.* Data Programming: Creating Large Training Sets, Quickly // *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2016. Vol. 29. P. 1–9.
36. *Anastassiou P. et al.* Seed-tts: A family of high-quality versatile speech generation models // *arXiv*. 2024. No. arXiv:2406.02430. P. 1–18.
37. *Nurlygaianov N.R., Kugurakova V.V.* A New Approach to Creating a Corpus of Video Game Texts // *Russian Digital Libraries Journal*. 2024. Vol. 27, No. 4. P. 578–597.

38. Tarjan R.E. Depth-First Search and Linear Graph Algorithms // SIAM Journal on Computing. 1972. Vol. 1, No. 2. P. 146–160.

39. Нурлыгаянов Н.Р., Кузуркова В.В., Шубин А.В. Интерактивный редактор для представления сценариев компьютерных игр в виде JSON с данными о диалогах, их зависимостях и персонажах: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU № 2025684890 от 18.09.2025 / правообладатель: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет». Заявка № 2025683882 от 20.08.2025.

40. Нурлыгаянов Н.Р., Кузуркова В.В., Шубин А.В. Программный комплекс для визуализации, интерактивного анализа и редактирования диалоговых структур в игровых сценариях: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU № 2025685255 от 22.09.2025 / правообладатель: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет». Заявка № 2025684052 от 25.08.2025.

41. Perrone G., Unpingco J., Lu H. Network Visualizations with Pyvis and VisJS // arXiv. 2020. No. arXiv:2006.04951. P. 1–10.

42. Sanh V. et al. DistilBERT: A Distilled Version of BERT // arXiv. 2019. No. arXiv:1910.01108. P. 1–5.

43. Barbieri F., Anke L.E., Camacho-Collados J. XLM-T: Multilingual Language Models in Twitter for Sentiment Analysis and Beyond // Proceedings of the Thirteenth Language Resources and Evaluation Conference. 2021. P. 258–266.

44. Devlin J. et al. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding // Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics. 2019. P. 4171–4186.

USING A MANUAL EDITOR AND A SEMI-AUTOMATIC PARSER OF SOURCE TEXTS TO BUILD A CORPUS OF GAME SCRIPTS

N. R. Nurlygaianov^[0000-0002-7969-0221]

Kazan (Volga region) Federal University, Kazan, Russia

nikita25@mail.ru

Abstract

A practical approach is proposed for building a specialized corpus of game scripts based on a combination of manual annotation and semi-automatic parsing of the source texts. The method integrates a graphical editor for expert annotation, a modular parser that performs initial structuring of the source texts using formal rules and heuristics, and a visualization of links between scenes. This combination provides an iterative cycle of expert validation necessary to obtain a correct and reproducible corpus.

Keywords: NLP, video game development, parsing, validation, visualization, game scripts, text corpus.

LUDOGRAPHY

Bethesda Game Studios. (2025) [2011.] *The Elder Scrolls V: Skyrim*. [video game][download][Windows, Xbox 360, PlayStation 3, Xbox One, PlayStation 4, Switch, Xbox Series X|S, PlayStation 5, Switch 2]. Bethesda Softworks.

Griptonite Games. (2009). *Assassin's Creed: Bloodlines*. [video game][UMD, download][PSP]. Ubisoft.

REFERENCES

1. Engström H. Game Development Research. Skövde: University of Skövde, 2020, 242 p.
2. Oliver G. Renegade or Paragon?: Categorizing Narrative Choice in Video Game Storylines // Dialogue: The Interdisciplinary Journal of Popular Culture and Pedagogy. 2020. Vol. 7, Iss. 1. No. 9. P. 1-13.
3. Goh E., Al-Tabbaa O., Khan Z. Unravelling the complexity of the Video Game Industry: An integrative framework and future research directions // Telematics and Informatics Reports. 2023. Vol. 12. No. 100100. P. 1–18.

4. Ashby T., Webb B. K., Knapp G., Searle J., Fulda N. Personalized Quest and Dialogue Generation in Role-Playing Games: A Knowledge Graph- and Language Model-based Approach // Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '23). 2023. P. 1–20.
5. Burgess J., Jones C. Exploring Player Understandings of Historical Accuracy and Historical Authenticity in Video Games // Games and Culture: A Journal of Interactive Media. 2022. Vol. 17. Iss. 5. P. 816–835.
6. Erb V., Lee S., Doh Y.Y. Player-Character Relationship and Game Satisfaction in Narrative Game: Focus on Player Experience of Character Switch in The Last of Us Part II // Frontiers in Psychology. 2021. Vol. 12. No. 709926. P. 1–11.
7. Zhang X., Huang Q., Shi Z., Zhang K. How Cultural Elements Shape Game Evaluations: The Role of Cultural Authenticity and Perceived Effort // Computers in Human Behavior. 2024. Vol. 162. No. 108452.
8. Inworld AI. Xbox partners with Inworld AI to build generative AI tools for game development. URL: <https://inworld.ai/blog/xbox-partners-with-inworld-ai-to-build-generative-ai-tools-for-game-development>
9. Microsoft. Project Explora, powered by Inworld AI & Microsoft. URL: <https://developer.microsoft.com/en-us/games/products/project-explora/>.
10. Klose T. Inworld AI. Will Bring Generative AI to Microsoft Xbox Game Development. URL: <https://voicebot.ai/2023/11/13/inworld-ai-will-bring-generative-ai-to-microsoft-xbox-game-development/>
11. Microsoft. Xbox and Inworld AI partner to empower game creators with the potential of Generative AI. URL: <https://developer.microsoft.com/en-us/games/articles/2023/11/xbox-and-inworld-ai-partnership-announcement/>
12. Huang J. Generating Dynamic and Lifelike NPC Dialogs in Role-Playing Games Using Large Language Models. Lappeenranta: LUT University, 2024. 78 p.
13. IGDA Localization SIG. Best Practices for Game Localization. URL: <https://igda-website.s3.us-east-2.amazonaws.com/wp-content/uploads/2021/04/09142137/Best-Practices-for-Game-Localization-v22.pdf>
14. Deterding S. Contextual Autonomy Support in Video Game Play: A Grounded Theory // Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems New York: ACM, 2016. P. 3931–3943.

15. *McEnery T., Hardie A.* Corpus Linguistics: Method, Theory and Practice Cambridge: Cambridge University Press, 2011. 295 p.
16. *Small S., Stromer-Galley J., Strzalkowski T.* Multi-modal annotation of quest games in Second Life // Proceedings of the 49th annual meeting of the association for computational linguistics: human language technologies. 2011. P. 171–179.
17. *Summerville A., Snodgrass S., Guzdial M., Holmgård C., Hoover A.K., Isaksen A., Nealen A., Togelius J.* Procedural Content Generation via Machine Learning (PCGML) // IEEE Transactions on Games. 2018. Vol. 10, No. 3. P. 257–270.
18. *van Stegeren J., Theune M.* Fantastic strings and where to find them: The quest for high-quality video game text corpora // 12th Intelligent Narrative Technologies Workshop (INT 2020) CEUR. 2021. P. 1–8.
19. *Rennick S., Roberts S.* The video game dialogue corpus // Corpora. 2024. Vol. 19, No. 1. P. 93–106.
20. *van Stegeren J., Myśliwiec J.* Fine-tuning GPT-2 on annotated RPG quests for NPC dialogue generation // Proceedings of the 16th International Conference on the Foundations of Digital Games. 2021. P. 1–8.
21. *Kybartas B., Bidarra R.* A survey on story generation techniques for authoring computational narratives // IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games. 2016. Vol. 9, No. 3. P. 239–253.
22. *Riedl M.O., Young R.M.* Narrative planning: Balancing plot and character // Journal of Artificial Intelligence Research. 2010. Vol. 39. P. 217–268.
23. *Ginel M.R., Theroine S.* Machine Translation and Gender Biases in Video Game Localisation: A Corpus-Based Analysis // Journal of Data Mining & Digital Humanities. 2022. P. 1–10.
24. *Hansen D., Houlmont P.Y.* A Snapshot into the Possibility of Video Game Machine Translation // Proceedings of the 15th Biennial Conference of the Association for Machine Translation in the Americas (Volume 2: Users and Providers Track and Government Track). 2022. Vol. 3. P. 257–269.
25. How Developers Localize Game Characters' Names, Voices, and More: Facts & Finer Points. URL: <https://igda.org/resources-archive/how-developers-localize-game-characters-names-voices-and-more-facts-finer-points/>

26. *Nathan D.* Sound and Unsound Practices in Documentary Linguistics: Towards an Epistemology for Audio and Video Corpora // *Language Documentation and Description*. 2010. Vol. 7. P. 262–288.
27. *Pirrone M., D’Ulizia A.* The Localization of Software and Video Games: Current State and Future Perspectives // *Information*. 2024. Vol. 15. No. 10.
28. *Raja R., Vats A.* Parallel Corpora for Machine Translation in Low-Resource Indic Languages: A Comprehensive Review // *Proceedings of the Eighth Workshop on Technologies for Machine Translation of Low-Resource Languages (LoResMT 2025)*. 2025. P. 129–143.
29. *Liu X., Xie Z., Jiang S.* Personalized Non-Player Characters: A Framework for Character-Consistent Dialogue Generation // *AI*. 2025. Vol. 6. No. 5.
30. *Bergsma T., van Stegeren J., Theune M.* Creating a Sentiment Lexicon with Game-Specific Words for Analyzing NPC Dialogue in The Elder Scrolls V: Skyrim // *Workshop on Games and Natural Language Processing*. 2020. P. 1–9.
31. *Gruber T.R.* A Translation Approach to Portable Ontology Specifications // *Knowledge Acquisition*. 1993. Vol. 5, No. 2. P. 199–220.
32. *Noy N.F. et al.* *Ontology Development 101: A Guide to Creating Your First Ontology*. 2001. P. 1–28.
33. *Snow R. et al.* Cheap and Fast – But Is It Good? Evaluating Non-Expert Annotations for Natural Language Tasks // *Proceedings of the 2008 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing*. 2008. P. 254–263.
34. *Mintz M. et al.* Distant Supervision for Relation Extraction without Labeled Data // *Proceedings of the Joint Conference of the 47th Annual Meeting of the ACL and the 4th International Joint Conference on Natural Language Processing*. 2009. P. 1003–1011.
35. *Ratner A.J. et al.* Data Programming: Creating Large Training Sets, Quickly // *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2016. Vol. 29. P. 1–9.
36. *Anastassiou P. et al.* Seed-tts: A family of high-quality versatile speech generation models // *arXiv*. 2024. No. arXiv:2406.02430. P. 1–18.
37. *Nurlygaianov N.R., Kugurakova V.V.* A New Approach to Creating a Corpus of Video Game Texts // *Russian Digital Libraries Journal*. 2024. Vol. 27, No. 4. P. 578–597.

38. *Tarjan R.E.* Depth-First Search and Linear Graph Algorithms // *SIAM Journal on Computing*. 1972. Vol. 1, No. 2. P. 146–160.

39. *Nurlygaianov N.R., Kugurakova V.V., Shubin A.V.* Interaktivnyi redaktor dlya predstavleniya stsensariiev komp'iuternykh igr v vide JSON s dannymi o dialogakh, ikh zavisimostyakh i personazhakh: svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EVM RU No. 2025684890 ot 18.09.2025 / pravoobladatel': federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Kazanskii (Privolzhskii) federal'nyi universitet". Zayavka No. 2025683882 ot 20.08.2025.

40. *Nurlygaianov N.R., Kugurakova V.V., Shubin A.V.* Programmnyi kompleks dlya vizualizatsii, interaktivnogo analiza i redaktirovaniya dialogovykh struktur v igrovykh stsensariyakh: svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EVM RU No. 2025685255 ot 22.09.2025 / pravoobladatel': federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Kazanskii (Privolzhskii) federal'nyi universitet". Zayavka No. 2025684052 ot 25.08.2025.

41. *Perrone G., Unpingco J., Lu H.* Network Visualizations with Pyvis and VisJS // *arXiv*. 2020. No. arXiv:2006.04951. P. 1–10.

42. *Sanh V. et al.* DistilBERT: A Distilled Version of BERT // *arXiv*. 2019. No. arXiv:1910.01108. P. 1–5.

43. *Barbieri F., Anke L.E., Camacho-Collados J.* XLM-T: Multilingual Language Models in Twitter for Sentiment Analysis and Beyond // *Proceedings of the Thirteenth Language Resources and Evaluation Conference*. 2021. P. 258–266.

44. *Devlin J. et al.* BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding // *Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics*. 2019. P. 4171–4186.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ



НУРЛЫГАЯНОВ Никита Рамильевич — ассистент кафедры индустрии разработки видеоигр ИТИС КФУ. Сфера научных интересов — автоматизация процесса разработки компьютерных игр.

Nikita Ramilevich NURLYGAIANOV — assistant at the Department of Video Game Development Industry of ITIS KFU. Research interest is automation of the computer game development process.

email: nikita25@mail.ru

ORCID: 0000-0002-7969-0221

Материал поступил в редакцию 10 мая 2026 года

ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВНОСТИ ГИБРИДНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВИЗУАЛЬНОГО ВОСПРИЯТИЯ ИГРОВЫХ АГЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТРИСОВКИ ТЕКСТУР

А. М. Примаченко^[0009-0008-6396-2035]

Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

primachenko.artem@mail.ru

Аннотация

Представлен алгоритм системы визуального восприятия для игровых агентов, реализованный в игровом движке Unity. Предложенный метод основан на сравнении изображений с двух камер, учитывающих сложные визуальные эффекты (освещение, тени, маскировку), и дополнен проверкой прямой видимости, учетом скорости движения объекта и механикой постепенного обнаружения. Алгоритм оптимизирован с применением асинхронных вычислений, динамической активации камер и ускоренных алгоритмов. Выполнено тестирование системы при различных уровнях нагрузки, сделаны выводы об условиях, оптимальных для работы алгоритма. Проведен также анализ научной литературы по схожим решениям, выявлены их сильные и слабые стороны. Результаты могут быть применены в разработке видеоигр для создания реалистичного поведения неигровых персонажей, особенно в играх с элементами скрытности.

Ключевые слова: видеоигры, искусственный интеллект, система восприятия, NPC, Unity, компьютерное зрение, геймдизайн.

ВВЕДЕНИЕ

Системы визуального восприятия неигровых персонажей (англ. non-playable character, NPC) в видеоиграх являются важным элементом, обеспечивающим реалистичность и интерактивность игрового процесса. Как отмечено в ряде работ [1-11], информация о видимости (или линии обзора) является ключевым элементом, позволяющим NPC строить пространственное представление о мире игры и принимать решения в реальном времени.

Традиционные подходы (проверка углов обзора, использование рейкастинга (от англ. raycast) и др.), обладают ограничениями, связанными с недостаточным учетом визуальных факторов, таких как освещение, тени и маскировка. Это приводит к неестественному поведению NPC, особенно в играх, использующих игровые механики невидимости («стелс-играх», от англ. stealth), где требуется высокая степень реализма [1].

Наиболее распространенным способом реализации системы зрения для неигровых персонажей является алгоритм из двух шагов: проверка нахождения целевого объекта в определенной зоне в игровом мире, часто динамически изменяющейся в зависимости от положения персонажа и называемой полем зрения, и проверка на наличие препятствий между персонажем и целевым объектом. Хотя такой подход прост в реализации, он не учитывает множество факторов реального визуального восприятия, что снижает убедительность игрового опыта.

Цель настоящего исследования была разработка системы визуального восприятия, которая учитывает сложные визуальные эффекты, обеспечивает гибкость настройки и в то же время остается оптимизированной для реального времени. Объектом исследования выступали методы реализации визуального восприятия NPC, а предметом – алгоритм, основанный на сравнении изображений и дополнительных механиках.

В работе [12] нами были проанализированы существующие системы визуального восприятия, выявлены их сильные и слабые стороны, а также был представлен спроектированный алгоритм и предложены методы его оптимизации и тестирования. В настоящей работе описаны детали его реализации, включая оптимизацию, а также процесс и результаты тестирования.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Для реализации системы зрения игрового агента необходимо определить, имеет ли наблюдатель прямую видимость объекта. Наиболее распространённым способом организовать данную механику является проверка пересечения объектом поля зрения наблюдателя [1-8], а также проверка наличия препятствий между наблюдателем и объектом при помощи рейкастов (англ. raycast) [1-9, 13]. Главная проблема этого подхода: он не учитывает

сложные визуальные эффекты, такие как освещение, тени, отражения и маскировка. Поэтому требуется более точный и гибкий подход, который мог бы учитывать визуальные особенности сцены.

Основной алгоритм

Проблема: традиционные методы определения видимости не учитывают визуальные эффекты, такие как освещение, тени и маскировка, что снижает реалистичность поведения NPC.

Решение: основной алгоритм системы зрения основан на сравнении изображений, отрисованных в игровом движке с точки зрения наблюдателя. Первое изображение включает в себя вид сцены с видимой целью, а второе – сцены без цели. Помимо цели оба изображения отрисовывают те же элементы сцены, что и основная камера игрока, включая уровень и освещение. Это позволяет учитывать все визуальные эффекты, такие как тени и отражения (рис. 1).

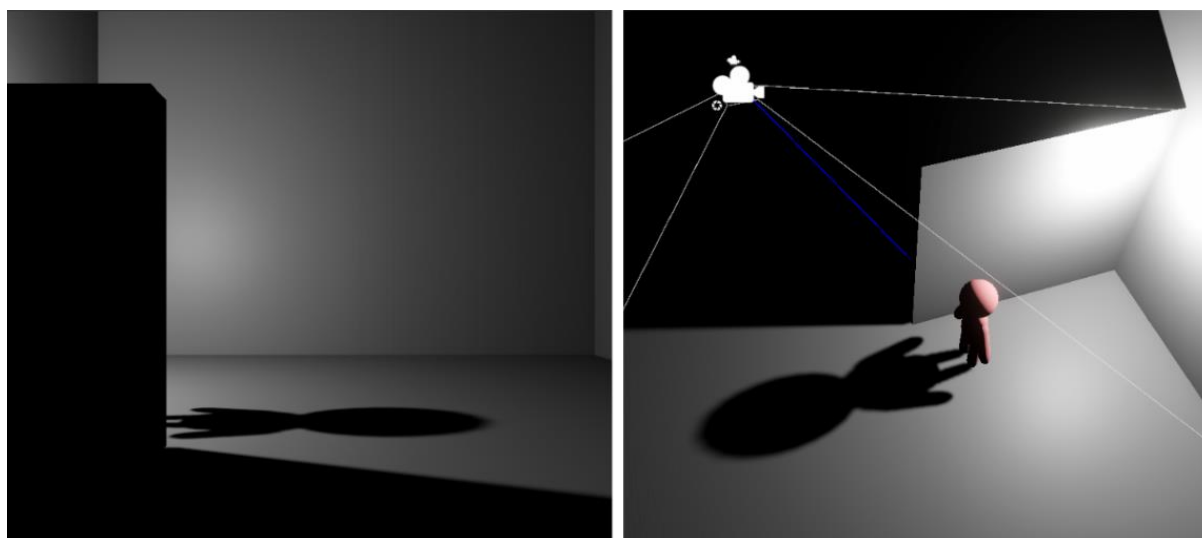


Рис. 1. Наблюдатель видит тень цели, но не саму цель.

Шаги решения:

1. Рендеринг сцены, включающей объект цели, в формат изображения.
2. Рендеринг сцены, исключающей объект цели, в формат изображения.
3. Сравнение пикселей, состоящее в вычислении разности пикселей по каналам RGB и суммировании для получения степени расхождения двух

изображений D . Для каждой пары соответствующих пикселей текстур вычисляем разность по каналам RGB. Эти разности суммируем, чтобы получить значение D :

$$D = \frac{\sum_{i=1}^N (|R_1 - R_2| + |G_1 - G_2| + |B_1 - B_2|)}{3 N},$$

где R_1, G_1, B_1 – значения каналов RGB для i -го пикселя на первом изображении, R_2, G_2, B_2 – значения каналов RGB для i -го пикселя на втором изображении, N – общее количество пикселей одного изображения.

4. Расчет видимости. По значению D с помощью некоторой функции рассчитаем величину V видимости цели. Если V превышает пороговое значение V_{min} , считаем, что наблюдатель видит цель, т. е. если $V > V_{min}$, то цель видима. Функция преобразования D в V может, например, следовать закону убывающей доходности

$$V = V_{max} D / (D + a),$$

где V_{max} – максимально возможное значение V , a – положительный коэффициент убывающей доходности; чем меньше значение a , тем быстрее V достигает значения, близкого к V_{max} , и выходит на «плато».

Подобный подход заимствует методы компьютерного зрения, попытки применить которые к компьютерным играм предпринимались ранее [14], однако в данном случае также используется преимущество дополнительной информации об искомом объекте, которую алгоритм может получить напрямую от игрового движка.

Такая реализация учитывает визуальные особенности сцены (освещение тени), а также предоставляет гибкость в виде множества переменных для настройки под конкретные обстоятельства, однако обладает высокой вычислительной сложностью из-за необходимости рендерить сцену несколько раз и считать расхождение изображений.

Периферийное зрение

Проблема: объекты, на которые направлен взгляд наблюдателя, являются настолько же заметными с точки зрения системы, как и объекты на границе его периферийного зрения, поскольку пиксели в центре созданного изображения имеют такой же визуальный вес, как и пиксели вдали от центра.

Решение: используем двоичную маску, чтобы определить, какие пиксели изображения стоит сравнивать, а какие – игнорировать. Чем дальше от центра маски, тем меньшее число пикселей учитываем при расчете D .

Таким образом, объекты на краю периферии наблюдателя оказывают влияние на меньшее число весовых отрисованных пикселей, значит, дают меньшее значение D , при этом цели по направлению взгляда наблюдателя остаются настолько же заметными. Кроме того, уменьшается вычислительная сложность алгоритма за счет меньшего объема необходимых вычислений разности пикселей, но увеличивается риск пропустить некоторые детали.

Маскировка объектов

Проблема: изначальный алгоритм сравнивает отдельные пиксели, что делает его чрезмерно чувствительным к мелким деталям; например, если цель – это персонаж, одетый в лесной камуфляж на фоне лесной сцены, даже небольшие различия в текстуре могут привести к его обнаружению. Это не позволяет объекту «сливаться» с окружающей обстановкой.

Решение: для уменьшения чувствительности к мелким деталям применяют размытие по Гауссу, которое снижает резкость изображения, что позволяет объекту маскироваться. Такой подход является также хорошим приближением того, как работает зрительное восприятие человека в реальности [15]. Сложность алгоритма размытия по Гауссу составляет $O(nr^2)$, где n – количество пикселей, а r – радиус круга, по которому усредняется каждый пиксель (другими словами, сила размытия).

Вместо традиционного гауссова фильтра можно применить фильтр Box Blur, который выполняет простое усреднение значений пикселей в квадратном окне. При нескольких последовательных пропусках Box Blur позволяет достичь результата, практически не отличимого от размытия по Гауссу, имея при этом линейную вычислительную сложность $O(n)$, что значительно снижает затраты по сравнению с гауссовым фильтром [16].

Шаги решения:

1. Размытие по Гауссу: перед сравнением текстур применим размытие по Гауссу. Это уменьшит резкость изображения и снизит чувствительность

алгоритма к мелким деталям. Радиус определяет степень размытия и обычно устанавливается в диапазоне от 1 до 5 пикселей.

2. Среднеквадратичная ошибка (MSE): вместо простой суммы разностей используем среднеквадратичную ошибку для расчета V :

$$V = \frac{\sum_{i=1}^N ((R_1 - R_2)^2 + (G_1 - G_2)^2 + (B_1 - B_2)^2)}{3 N},$$

что позволит уменьшить влияние незначительных изменений в поле зрения и увеличить вес серьезных различий.

В итоге уменьшится чувствительность наблюдателя к мелким деталям и шуму, а у цели появится возможность маскироваться в подходящей обстановке, однако еще больше увеличится вычислительная сложность алгоритма.

Проверка прямой видимости

Проблема: наблюдатель может реагировать на тени, отражения или малую часть объекта так же, как и на сам объект. Это приводит к ложным срабатываниям, когда наблюдатель «видит» цель, хотя на самом деле он видит только ее тень или отражение.

Решение: для устранения этой проблемы введем проверку рейкастами. На модели цели равномерно распределим X точек, которые проверим на видимость с помощью рейкастов (рис. 2).

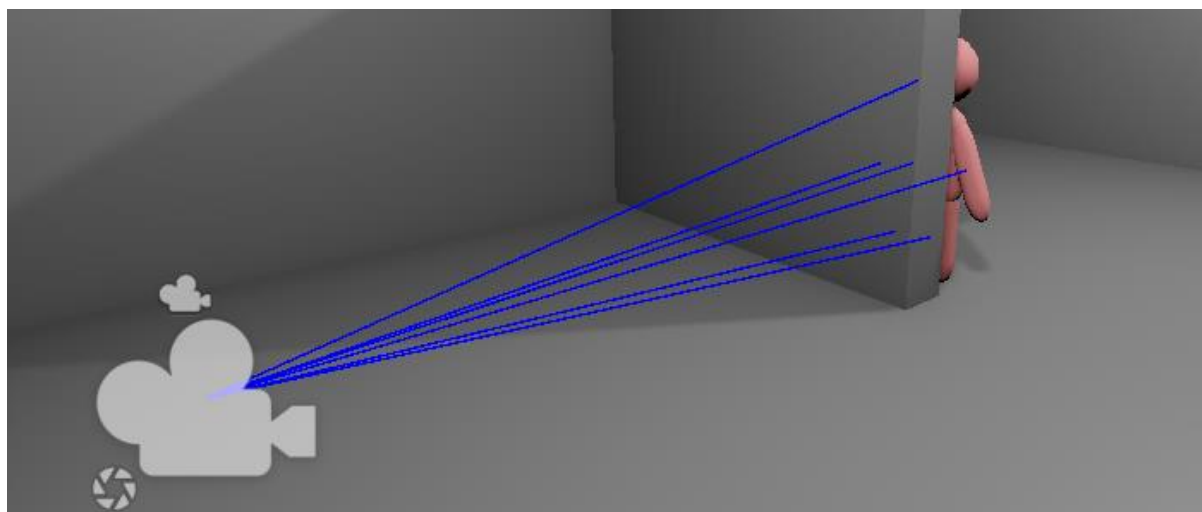


Рис. 2. Пучок из 6 рейкастов, направленных в разные части цели.

Если количество точек X_{pass} , прошедших проверку, превысит пороговое значение X_{min} , считаем, что наблюдатель видит сам объект. Если $X_{pass} < X_{min}$, то наблюдатель видит тень, отражение или малую часть объекта. В этом случае наблюдатель получит информацию о координатах цели и с помощью отдельной логики попытается получить визуальное подтверждение объекта.

Шаги решения:

1. Распределение точек на цели: на модели цели равномерно распределим X точек, где X обычно принимает значения от 5 до 20 в зависимости от размера и сложности модели.

2. Проверка рейкастами: для каждой точки выполним рейкаст от наблюдателя до точки. Если луч не пересечет препятствий, точку считаем видимой.

3. Определение видимости цели: если количество видимых точек X_{pass} превышает пороговое значение X_{min} , цель считаем видимой. В противном случае наблюдатель видит только тень или отражение.

4. Попытка визуального подтверждения: если наблюдатель обнаружил объект, но не имеет прямой видимости, он попытается получить визуальное подтверждение объекта, например, повернуться в его сторону или же при помощи алгоритма поиска пути дойти до позиции объекта.

Таким образом, можно разделить логику поведения наблюдателя, когда он имеет прямую видимость цели или видит «подсказку», где она находится. Это позволит сделать поведения наблюдателя более реалистичным, но еще больше увеличит вычислительную сложность алгоритма из-за необходимости выполнения рейкастов.

Влияние скорости движения объекта на его заметность

Проблема: в реальности быстро движущиеся объекты заметить легче, чем медленно движущиеся или статичные. Текущий алгоритм не учитывает скорость движения цели, что может привести к нереалистичному поведению наблюдателя.

Решение: для учета скорости движения цели введем параметр eV – эффективное значение V , который рассчитаем как произведение V на

множитель, зависящий от скорости движения цели. Чем выше скорость цели, тем больше множитель, что увеличит заметность объекта.

Шаги решения:

1. Расчет скорости цели: определим скорость движения цели на основе ее позиции в предыдущих кадрах.
2. Расчет множителя: множитель α для V рассчитаем на основе скорости цели. Например, множитель может быть линейно зависимым от скорости.
3. Расчет V : эффективное значение V рассчитываем как $e \cdot V = V \cdot \alpha$.
4. Если $e \cdot V > V_{min}$, значит, наблюдатель видит цель.

Такая реализация обладает большей реалистичностью и создает дополнительный геймплейный элемент для стелс-игр, где игрок должен двигаться медленно, чтобы оставаться незамеченным, но может потребовать осторожной настройки вычисления значения α .

Механика постепенного обнаружения

Проблема: в некоторых случаях обнаружение не должно быть мгновенным. Например, наблюдатель может постепенно «замечать» цель, что добавит реализма и в случае стелс-игр сделает геймплей более честным с точки зрения игрока в ситуации, когда наблюдателями являются противники, а объектом – сам игрок.

Решение: для реализации постепенного обнаружения введем параметр Det – степень обнаружения, который изменяется в зависимости от значения V и скорости обнаружения Det_{speed} .

Если $V > V_{min}$, то Det увеличится на $\Delta Det_{Det_{speed}}$ в каждом кадре. Если $V < V_{min}$, то Det уменьшится на величину угасания Dec . Когда Det превысит пороговое значение Det_{min} , цель считаем обнаруженной.

Это дает системе еще большую гибкость и в случае стелс-игр создает более честный игровой опыт с точки зрения игрока, давая ему возможность среагировать на угрозу, однако может потребоваться дополнительная логика для реакции наблюдателя на «подозрительный» объект, когда $0 < Det < Det_{min}$.

Оптимизация

Рассматриваемый алгоритм имеет высокую вычислительную сложность, что может негативно сказаться на производительности игры, особенно при большом количестве наблюдателей и целей. Для повышения производительности предложим следующие оптимизации.

1. Асинхронная реализация: системе необязательно выполнять все необходимые расчеты за один игровой кадр, вместо этого алгоритм выполнится в побочных потоках программы, а наблюдатель среагирует на изменения, как только закончится выполнение алгоритма.
2. Отрисовка сцены: происходит только непосредственно перед расчетом значения D , а не в каждом кадре, исключая лишнюю нагрузку на видеокарту.
3. Распределение нагрузки: в случае существования на сцене нескольких наблюдателей их обработка происходит по алгоритму Round-Robin, что увеличивает время реакции каждого из наблюдателей, но также снижает максимальную нагрузку на процессор и видеокарту.
4. Снижение разрешения текстур: для расчета D используем текстуры с более низким разрешением, чем основная камера игры, что значительно уменьшит количество пикселей для обработки.
5. Параллелизация: некоторые части алгоритма, например размытие по Гауссу, могут выполняться в параллельном режиме, задействуя несколько ядер процессора и тем самым снижая время выполнения задачи.

РЕАЛИЗАЦИЯ

В качестве платформы для реализации системы зрения был выбран игровой движок Unity, что обусловлено такими его преимуществами, как встроенные инструменты рендеринга для работы с камерами и текстурами, удобная система физики для точных рейкаст-проверок и возможность быстрого прототипирования с визуальной отладкой.

Компоненты системы

Реализованная система состоит из трех основных компонентов:

- наблюдаемых объектов (Observable);
- объектов-наблюдателей (Observer);

- класса, управляющего наблюдателями (VisionSystem), а также трех вспомогательных компонентов:
 - для наблюдаемых объектов – это компонент, реализующий проверку линий видимости (RaycastClusterCheck);
 - для объектов наблюдателей – генерация маски для сравнения текстур (VisionMask);
 - для управляющего класса – опциональный модуль размытия текстур (FastGaussianBlur).

Компонент Observable реализует класс наблюдаемых объектов, т. е. объектов, имеющих визуальное представление на сцене и распознаваемых наблюдателями. Он содержит информацию о компонентах отрисовки, методы для управления слоями этих компонентов, а также информацию о скорости объекта и настройки проверки линий видимости.

С каждым объектом класса Observable связан объект вспомогательного класса RaycastClusterCheck, который определяет на цели точки в пространстве, относительно которых будет проходить проверка линий видимости, а также реализует логику этой самой проверки.

Компонент Observer реализует класс объектов наблюдателей. Каждый наблюдатель может отслеживать одну или несколько целей. В классе хранятся пары отрисованных текстур поля зрения наблюдателя, включающие и исключающие обозначенные цели, а также реализованы методы отрисовки или же обновления этих текстур. После каждого обновления текстур вызывается событие TexturesWereUpdated, чтобы уведомить любые зависимые классы, например UIManager, о необходимости их собственного обновления.

Кроме того, в классе Observer определены механики обнаружения целей:

- показатель расхождения текстур преобразуется в значение видимости целей;
- в зависимости от этого значения растет или уменьшается показатель подозрения наблюдателя;
- при достаточно высоком значении показателя подозрения происходит переход в режим тревоги.

Отметим, что описанная логика реализуется только в том случае, если проверка линий видимости отслеживаемых объектов-целей оказалась успешной, в соответствии с выставленными параметрами этих объектов.

С каждым объектом класса `Observer` связан вспомогательный объект класса `VisionMask`, который в начале работы программы генерирует и сохраняет маску зрения наблюдателя, на которую будет ссылаться класс, вычисляющий расхождение текстур. Маска определяет, какие пиксели будут сравниваться, а какие игнорироваться. Маска является максимально плотной в центре, что соответствует сравнению каждого включенного пикселя, и быстро теряет плотность по мере удаления от центра.

Класс `VisionSystem` является ключевой компонентой, координирующей работу системы зрения. Он управляет обновлением текстур наблюдателей, которое в целях оптимизации происходит по алгоритму Round-Robin. Здесь также реализованы алгоритмы сравнения текстур поля зрения, хранящихся у наблюдателей, для подсчета значения их расхождения, а также опциональная генерация тепловой карты, используемой в процессе тестирования системы. Все методы реализованы в асинхронном режиме, что позволяет системе работать, не задерживая основной поток программы.

Если переменная `VisionBlurRadius` объекта класса `Observer` имеет ненулевое значение, перед сравнением текстур происходит их обработка при помощи наложения размытия по Гауссу, реализованная в классе `FastGaussianBlur`. Значение `VisionBlurRadius` в этом случае берется в качестве параметра радиуса или же степени размытия. Для обработки текстур использован специальный алгоритм, выдающий результат, практически не отличимый от традиционного гауссова размытия, но обладающий вычислительной сложностью $O(N)$ вместо стандартной $O(NR)$, где N – количество пикселей в изображении, а R – радиус размытия.

Кроме перечисленных компонентов существуют классы `PlayerControl` и `UIManager`, не являющиеся частью системы зрения, но используемые в процессе тестирования системы. `PlayerControl` обеспечивает функции управления передвижением персонажа игрока и направления взгляда его камеры. `UIManager` сохраняет и выводит в интерфейс игры актуальную информацию о работе системы зрения, включая вычисляемые параметры наблюдателей

(например, расхождение текстур или уровень подозрения), время реакции наблюдателей, отрисованные или обработанные текстуры, тепловую карту, значение FPS (количество кадров видеоигры, отрисовываемых за секунду, от англ. frames per second) и пр.

На рис. 3 представлена изображена диаграмма классов, визуализирующая связь объектов в системе. Отметим, что на диаграмме изображены лишь классы, формирующие собой систему зрения, что не относится к классам `PlayerControl` и `UIManager`. Диаграмма также не включает в себя встроенные классы Unity.

Далее дано описание всех перечисленных классов и деталей их работы
сказано ниже.

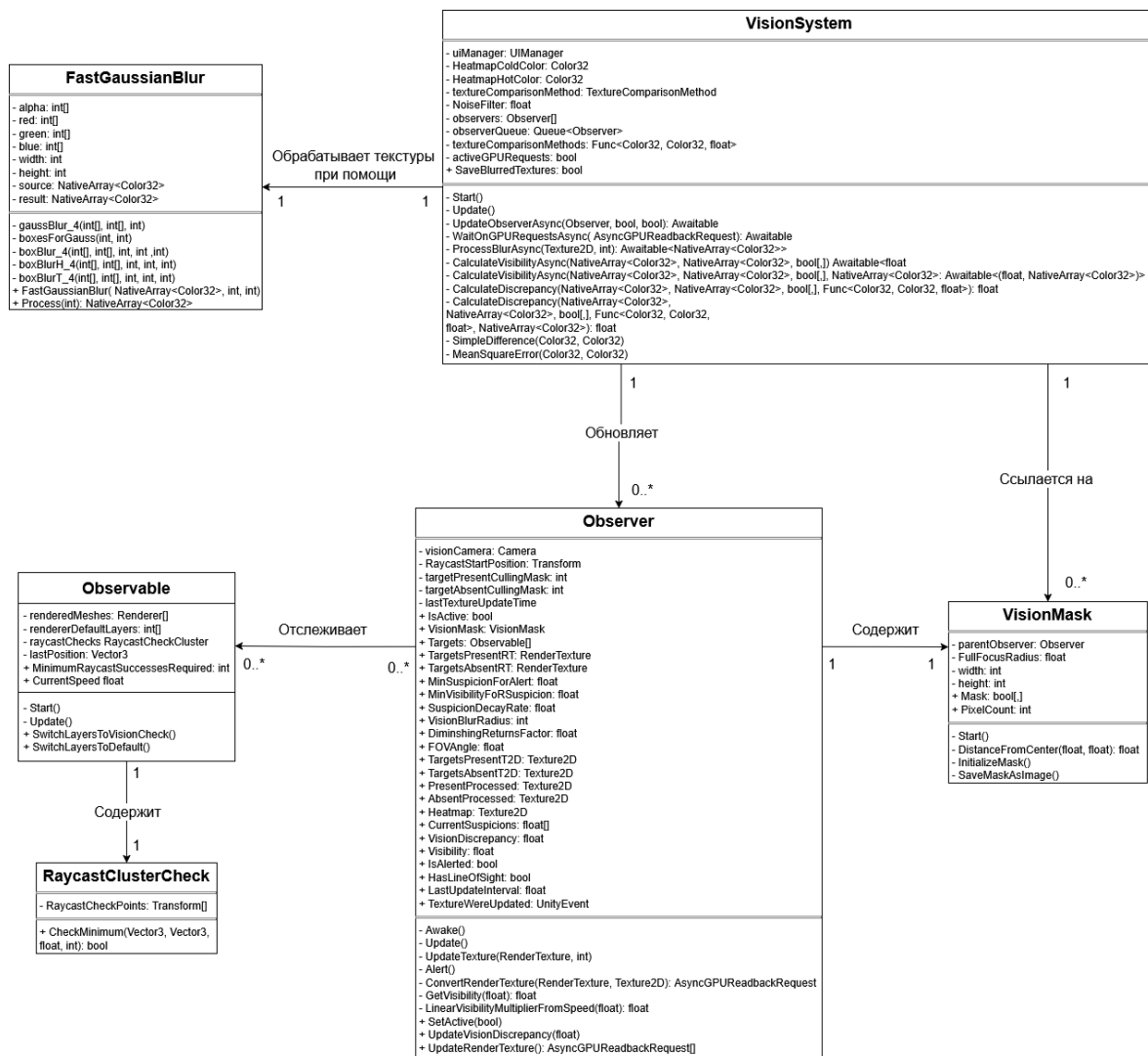


Рис. 3. Диаграмма классов, описывающая систему зрения.

Observable

Компонент Observable реализует класс наблюдаемых объектов, т. е. объектов, имеющих визуальное представление на сцене и распознаваемых наблюдателями, объектами класса Observer.

Для корректной работы наблюдаемому объекту необходимо предоставить `RenderedMeshes` – массив ссылок на объекты класса `Renderer`, т. е. не объекты, отвечающие за отрисовку визуального отображения моделей на камерах, присутствующих на сцене. Другими словами, это все составные части игрового объекта, по которым его можно визуально идентифицировать.

В классе Observable реализованы вспомогательные методы `SwitchLayersToVisionCheck()` и `SwitchLayersToDefault()`, исполняющие функцию переключения «слоев» объектов из массива `RenderedMeshes` – эта функция используется позднее в скрипте `Observer`.

Для достижения корректного переключения объектов между слоями в начале работы скрипта слои всех объектов в `RenderedMeshes` сохраняем в массив слоев по умолчанию – `rendererDefaultLayers`, чтобы далее можно было после любой работы со слоями вернуть их в начальное состояние.

Метод `SwitchLayersToVisionCheck()` изменяет слой каждого из объектов в `renderedMeshes` на созданный слой `VisionCheck`, который будет игнорироваться во время рендера текстуры, исключаящей искомые цели наблюдателя. Метод `SwitchLayersToDefault()` также изменяет слои объектов `renderedMeshes`, однако он возвращает их к сохраненным значениям по умолчанию.

Кроме того, поскольку система зрения учитывает скорость, с которой движется объект-цель, класс Observable в каждом кадре рассчитывает скорость родительского объекта. Достигается это путем сохранения вектора – предыдущей позиции объекта – через компонент `Transform` и вычисление разности с текущей позицией. Длина вектора, полученного таким вычитанием, делится на время, прошедшее с выполнения предыдущего кадра (`Time.deltaTime`), чтобы получить мгновенную скорость.

Каждый объект класса Observable также обязан быть связан с соответствующим объектом класса `RaycastCheckCluster`, описанного ниже.

RaycastCheckCluster

Класс RaycastCheckCluster является вспомогательным компонентом для класса Observable и реализует логику проверки линий видимости объекта относительно заданной позиции.

Для корректной работы класса сначала необходимо создать набор пустых объектов с компонентом Transform, которые будут представлять собой точки в пространстве – позиции, на которые будут направлены рейкасты (рис. 4).



Рис. 4. Расставленные на модели точки проверки линий видимости.

Логика проверки линий видимости реализована в методе CheckMinimum(), который возвращает успех или неудачу проведенной проверки. В нем происходит проверка рейкастом для каждой из точек в массиве RaycastCheckPoints: луч выпускается из позиции raycastStart в направлении точки, и если он успешно достигает ее, не встретив препятствий, и при этом угол между вектором рейкаста и forwardVector не больше fov, то счетчик успехов увеличивается. Если количество успешных проверок достигает значения minSuccesses, то метод возвращает «истину».

Observer

Компонент Observer реализует класс объектов-наблюдателей и включает логику отрисовки текстур поля зрения, вызова проверки линий видимости, расчета показателя видимости цели и управления уровнем подозрения наблюдателя.

Observer – первичная настройка

У каждого наблюдателя должна быть определена ссылка на компонент Camera – камеру, которую наблюдатель будет использовать для отрисовки поля зрения. В практическом смысле камера – это глаза наблюдателя. По этой причине для наибольшей реалистичности рекомендуется расположить эту камеру там же, где на игровой модели персонажа расположены глаза (например, в случае, если наблюдатель – камера видеонаблюдения, там, где расположен объектив), повернуть ее так, чтобы вектор направления «вперед» совпал с ожидаемым направлением взгляда персонажа, а вектор «вниз» в большинстве случаев рекомендуется установить по направлению гравитации в игровом мире. Камеру также рекомендуется сделать дочерним объектом модели персонажа, чтобы она предсказуемым образом повторяла все его перемещения и повороты.

Изменение параметров компонента камеры позволяет влиять на то, что будет видеть NPC во время игрового процесса. Существующие настройки включают угол обзора камеры, минимальную и максимальную дистанции геометрии от камеры для ее отрисовки (англ. Clipping planes), маску слоев, отрисовываемых камерой, и т. д.

Для корректной работы проверки линий видимости между наблюдателем и целью системе необходимо иметь информацию об установленном угле обзора камеры. По умолчанию компонент Camera в Unity позволяет получить информацию только о вертикальном угле ее обзора.

Горизонтальный угол обзора рассчитываем по следующей формуле

$$hFOV = \frac{180}{\pi} 2 \arctg(\text{aspect} \cdot \tg(vFOV \frac{\pi}{180} 0.5)),$$

где aspect – соотношение сторон ширины и высоты камеры, а $vFOV$ – ее вертикальный угол обзора. В качестве значения FOVAngle выбираем наибольшую из величин $vFOV$ и $hFOV$, чтобы убедиться, что объекты, находящиеся за пределами меньшего угла обзора, но в пределах большего, будут успешно обнаружены.

Observer – отрисовка текстур

Для корректной работы наблюдателя необходимо создать в ассетах проекта текстуру класса `RenderTarget` и назначить ее в поле `RenderTargetSettings`, которое будет использовано как образец для текстур отрисовки выбранного наблюдателя. В параметрах созданной `RenderTarget` можно задать такие настройки, как разрешение текстуры, параметры сглаживания и фильтрации, а также формат цвета текстуры. Для различных наблюдателей можно создавать разные образцовые ассеты `RenderTarget` или же использовать одну и ту же текстуру для всех.

При назначении разрешения текстуры рекомендуется сохранять то же соотношение сторон, что использует камера выбранного наблюдателя. Конкретные значения ширины и высоты текстуры рекомендуется сохранять в пределах нескольких сотен пикселей для наилучшей оптимизации. Рекомендуемый формат цвета – это `R8G8B8A8_UNORM`, с которым система работает лучше всего.

При начале работы системы каждый компонент `Observer` создает два объекта `RenderTarget`, копируя настройки, указанные в `RenderTargetSettings`: `TargetsPresentRT` и `TargetsAbsentRT`. Первая будет использована для сохранения результатов отрисовки, включающей объекты-цели, а вторая – для отрисовки, исключаяющей их. Создаются также маски отбраковки (англ. `Culling mask`) `targetsPresentCullingMask` и `targetsAbsentCullingMask` для использования при отрисовке текстур `TargetsPresentRT` и `TargetsAbsentRT`.

Для отрисовки текстур реализован метод `UpdateRenderTextures()`, однако внутри класса `Observer` он не вызывается – вместо этого его вызов происходит в нужное время из управляющего наблюдателями класса `VisionSystem`. Первое, что необходимо сделать перед отрисовкой текстур, – переключить слои объектов `Renderer` у объектов целей на слой `VisionCheck`. Для этого у каждой из целей в массиве `Targets` происходит вызов метода `SwitchLayersToVisionCheck()`. После этого выполним следующий алгоритм.

1. Вызовем метод для обновления текстур `UpdateTexture()`. В нем у камеры наблюдателя изменится целевая текстура, т. е. текстура, в которую будет записан результат отрисовки, а также назначена ее маска отбраковки. Затем

происходит ручной вызов `Render()` метода отрисовки, определенного в классе `Camera`, который позволит произвести отрисовку изображения с камеры в целевую текстуру при использовании назначенной маски отбраковки. В конце целевая текстура камеры изменится на значение `null`, чтобы избежать неожиданных изменений в ранее назначенной текстуре.

2. Вызовем метод `ConvertRenderTexture()`, асинхронно преобразующий текстуру класса `RenderTexture` в текстуру класса `Texture2D` для последующей обработки и расчета несоответствия в классе `VisionSystem`.

3. В методе `ConvertRenderTexture()` выполним следующий код (Листинг 1). Класс `AsyncGPUReadback` позволит асинхронным образом прочитать информацию о записанной в память видеокарты текстуры `renderTexture`. Эта информация затем будет использована, чтобы скопировать данные о пикселях `renderTexture` и записать их в текстуру `targetTexture`, также асинхронно, сохранив таким образом изображение в новом формате. Класс возвращает объект асинхронного запроса, который можно использовать для проверки завершения процесса записи данных пикселей. По завершению выполнения запроса в текстуре `TargetsPresentT2D` сохранится обновленное изображение камеры наблюдателя, включающее в себя отрисовку объектов-целей (рис. 5).

Листинг 1. Асинхронное преобразование текстуры.

```
var request = AsyncGPUReadback.Request(renderTexture, 0,
(AsyncGPUReadbackRequest asyncAction) =>
{
    targetTexture.SetPixelData(asyncAction.GetData<byte>(), 0);
    targetTexture.Apply();
});
return request;
```

Все перечисленные шаги, применяемые к объектам `TargetsPresentRT`, `targetsPresentCullingMask` и `TargetsPresentT2D`, повторяются и для объектов `TargetsAbsentRT`, `targetsAbsentCullingMask` и `TargetsAbsentT2D`, чтобы получить изображение текстуры, исключающей отрисовку объектов-целей (рис. 5).

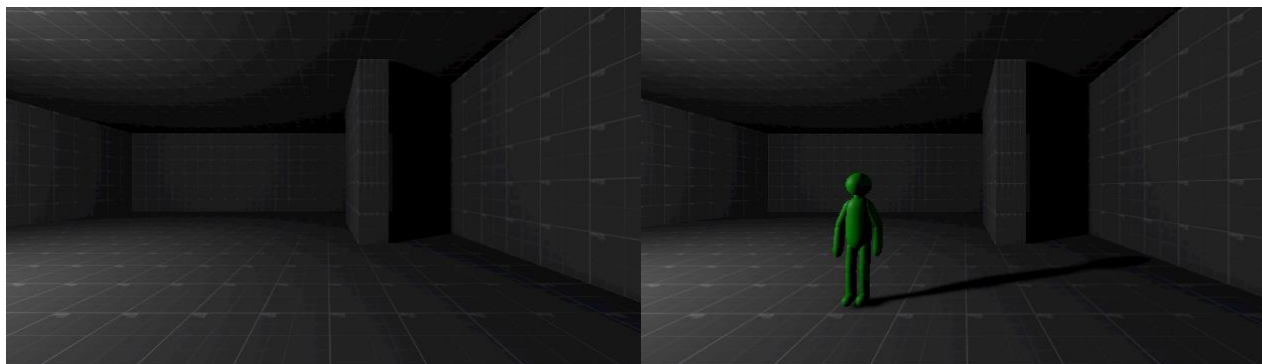


Рис. 5. Пример текстуры, включающей цель (слева), и текстуры, исключающей цель (справа).

После выполнения всех этих операций для всех объектов в массиве `Targets` вызываем метод `SwitchLayersToDefault()`, чтобы вернуть компонентам `Renderer` у целей их слои по умолчанию и позволить им продолжить работу в привычном режиме.

Observer – механики подозрения

Финальный результат работы системы зрения состоит в изменении уровня подозрения у всех наблюдателей. Происходит это исходя из рассчитанного значения несоответствия текстур (`VisionDiscrepancy`).

Значение `VisionDiscrepancy` изменяется извне класса путем вызова метода `UpdateVisionDiscrepancy()` классом `VisionSystem`. Этот метод устанавливает новое значение несоответствия текстур, а также новое значение величины видимости объектов в поле зрения, рассчитанное в методе `GetVisibility()`. Метод использует следующую формулу

$$V = 100D \div (D + 0.1^P),$$

где V – видимость, D – значение несоответствия текстур, а P – значение параметра `VisibilityDiminishingReturnsPower`.

В методе `Update()` в каждом кадре работы программы происходит изменение уровней подозрения наблюдателя в зависимости от рассчитанного значения `Visibility`. Для каждой из целей наблюдателя реализован следующий алгоритм.

1. Рассчитаем значение эффективной видимости по формуле

$$eV = V(1 + \frac{speed}{2}),$$

где V – значение Visibility, eV – эффективная видимость цели, а speed – ее скорость.

2. Проведем проверку линий видимости между наблюдателем и целью путем вызова метода CheckMinimum() у привязанного к цели объекта класса RaycastCheckCluster. Минимальное число успехов – это настраиваемый параметр у выбранной цели.

3. Если значение эффективной видимости равно или превышает значение параметра MinVisibilityForSuspicion, значение уровня подозрения для текущей цели увеличим на величину, равную произведению эффективной видимости и времени, прошедшего с момента последнего вызова метода Update() (Time.deltaTime).

4. Если уровень подозрения цели достигнет значения MinSuspicionForAlert, то вызовем метод Alert(), принимающий текущую цель и результат проверки линий видимости, в зависимости от которого может выполняться разная логика, конкретная реализация которой не входит в рамки системы зрения.

5. Если же значение эффективной видимости меньше значения параметра MinVisibilityForSuspicion, то значение подозрения для текущей цели уменьшим на величину, равную произведению параметра SuspicionDecayRate и значения Time.deltaTime.

VisionMask

У каждого объекта-наблюдателя должен быть определен компонент VisionMask, который отвечает за генерацию и хранение маски зрения – массива Mask, передающего системе зрения информацию о том, какие пиксели текстур нужно сравнивать, а какие – игнорировать. Двумерная маска представляет собой массив булевых значений, где значение «истина» в ячейке $(i; j)$ сообщает о необходимости принять соответствующие пиксели на позициях $(i; j)$ в расчет величины несоответствия текстур, а значение «ложь» – о необходимости проигнорировать их.

Инициализированная маска сообщает системе о необходимости сравнивать каждый пиксель текстур в некотором настраиваемом радиусе от их

центра, а вне этого радиуса плотность сравниваемых пикселей уменьшается в кубической зависимости от расстояния пикселя до центра (рис. 6).

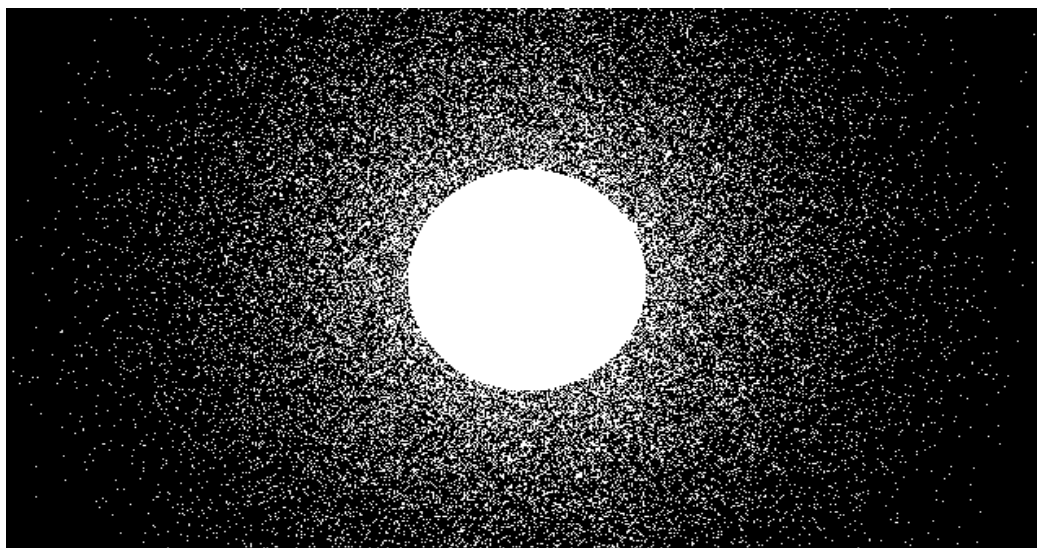


Рис. 6. Визуализация маски зрения.

Использование маски имеет сразу несколько преимуществ:

- имитация периферийного зрения – участки текстур вблизи ее центра имеют намного больший вес в сравнении с участками далеко от центра, что соответствует поведению, когда объекты по направлению взгляда наблюдателя являются значительно более заметными по сравнению с объектами на грани периферии;
- оптимизация – поскольку количество пикселей, для которых происходит подсчет разностей, резко уменьшается по мере удаления от центра текстур, также снизится и общее количество необходимых вычислений;
- открыта возможность использования более высоких разрешений отрисовываемых и сравниваемых текстур, поскольку вычисления разностей малозначимых пикселей на краю периферийного зрения больше не оказывают влияние на производительность, а точность вычислений в центре значительно увеличивается. При этом стоит отметить, что маска не влияет на время отрисовки текстур, а влияет лишь на время их сравнения.

FastGaussianBlur

Для выполнения функции управления зоркостью наблюдателей в систему был интегрирован опциональный модуль, реализующий обработку текстур при

помощи размытия по Гауссу. Использование этого модуля определяется параметром `VisionBlurRadius` класса `Observer`, а выполняется он в классе `VisionSystem`.

Модуль принимает в качестве параметра массив из объектов `Color32`, являющийся представлением текстуры в формате `NativeArray`, который позволяет работать с памятью, хранящей в себе текстуру напрямую.

Процесс размытия выполняется только при вызове метода `Process()`, принимающего в качестве параметра целочисленный радиус гауссова размытия. Метод формирует новые массивы цветовых каналов, которые будут отражать цвета пикселей новой, размытой текстуры. Алгоритм основан на наблюдении о том, что применение несколько раз размытия “Box Blur” к одному и тому же изображению дает результат, приближенный к гауссовому размытию [16]. Классический алгоритм размытия по Гауссу имеет вычислительную сложность $O(nr^2)$, где n – количество пикселей в изображении, а r – радиус размытия. В то же время оптимизированный алгоритм имеет вычислительную сложность $O(n)$, позволяя значительным образом снизить время вычислений, при этом погрешность результата в сравнении с классическим алгоритмом составляет в среднем всего 0.04% на пиксель [17].

Значения цветовых каналов, полученные в результате выполнения алгоритма, сохраняются в массиве цветов формата `Color32`, являющемся представлением результата обработки текстуры гауссовым размытием (рис. 7). Итоговый массив возвращается методом `Process()`.

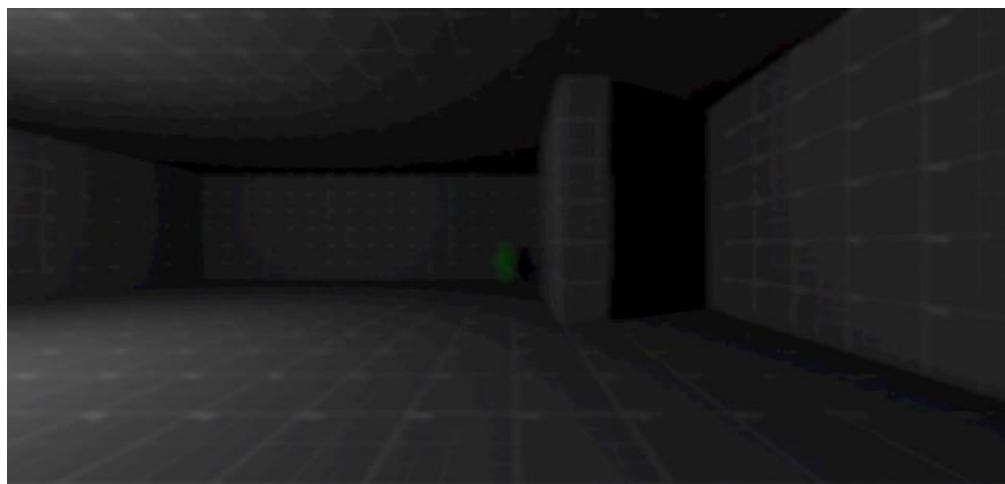


Рис. 7. Пример текстуры, обработанной гауссовым размытием.

VisionSystem

Класс VisionSystem координирует работу системы зрения путем вызова методов обновления текстур отрисовки наблюдателей, обработки текстур, сравнения их для подсчета значения расхождения, а также для создания тепловой карты для тестирования.

В начале работы класса инициализируется массив observers, затем он заполняется всеми объектами с компонентом Observer на текущей сцене. После этого все наблюдатели также добавляются в очередь observerQueue.

В каждом кадре работы программы система зрения проверяет, существуют ли в очереди ожидающие обработки наблюдатели. Если существуют и при этом значение activeGPURequests – «ложь», то из очереди удаляется первый наблюдатель, и, если он активен, система создает новую задачу из метода UpdateObserverAsync(), в ином случае наблюдатель возвращается в конец очереди.

Ключевым моментом оптимизации системы зрения является применение асинхронного программирования, которое позволяет выполнять части кода в побочных потоках программы, задействуя несколько ядер процессора, и тем самым не задерживать основной поток, значительно увеличивая как средний, так и минимальный показатели FPS. Чтобы добиться асинхронной работы системы зрения, метод UpdateObserverAsync(), а также многие методы, вызываемые в нем, были реализованы с помощью Awaitable – класса асинхронных задач в Unity, схожего с классом Task в языке программирования C#. Асинхронные классы возвращают объект класса Awaitable, а также задействуют ключевое слово await и методы Awaitable.MainThreadAsync() и Awaitable.BackgroundThreadAsync() для обеспечения асинхронной работы кода.

Метод UpdateObserverAsync() отвечает за обновление всех необходимых свойств наблюдателя. Первым шагом для этого является вызов у наблюдателя метода UpdateRenderTextures(). Поскольку метод выполняет запись отрисованных текстур в новый формат асинхронно, прежде чем продолжить их обработку, необходимо дождаться завершения возвращенных методом запросов, для этого используется метод WaitOnGPURequestsAsync() вместе с ключевым словом await. Как только выполнение запросов завершится, текстуры

TargetsPresentT2D и TargetsAbsentT2D сохраняются в переменные pTexture и aTexture соответственно.

Перед вызовом метода обновления текстур значение activeGPURequests приравняем «истине», чтобы предотвратить обновление других наблюдателей в очереди и тем самым снизить максимальную нагрузку на видеокарту. После окончания выполнения асинхронных запросов к видеокарте значение activeGPURequests приравняем «лжи».

Далее выполняем вызов асинхронного метода ProcessBlurAsync() для текстур pTexture и aTexture. Сначала в методе создаем представление текстуры в виде нативного массива colorArray из объектов класса Color32 путем вызова метода GetRawTextureData() у переданной текстуры. Поскольку данный метод может выполняться лишь в главном потоке программы, перед этим происходит вызов Awaitable.MainThreadAsync() с ключевым словом await.

Затем, если переданный радиус размытия больше нуля, сначала происходит переход в побочный поток программы при помощи кода await Awaitable.BackgroundThreadAsync(), после чего создается новый объект класса FastGaussianBlur на основании переданной текстуры, а затем возвращается результат вызова у класса размытия метода Process() с аргументом радиуса размытия, – все выполняется в асинхронном режиме. Таким образом, метод возвращает текстуру, обработанную классом FastGaussianBlur, или же саму исходную текстуру в формате нативного массива из Color32, если переданный радиус размытия был неположительным.

После получения текстур в формате NativeArray<Color32> метод UpdateTexturesAsync() вызывает одну из перегрузок метода CalculateDiscrepancyAsync() в зависимости от того, необходимо ли создание тепловой карты. Обе перегрузки, в свою очередь, проводят синхронизацию с побочными потоками программы и совершают вызов соответствующей перегрузки метода CalculateDiscrepancy(), обе из которых выполняются по следующему алгоритму.

1. В качестве параметров принимают две текстуры в формате NativeArray<Color32>, которые и будут сравниваться между собой. Кроме того, принимается маска зрения, определяющая, какие пиксели будут игнорироваться, и формула расчета разницы пикселей.

2. Во вложенном цикле, проходящем по каждой координате пикселей двух текстур, происходит проверка значения соответствующей ячейки массива-маски. Если оно – «ложь», пиксель пропускается, иначе происходит расчет разности пикселей двух текстур по текущим координатам с применением переданной формулы. Полученная разность прибавляется к `diff` – накапливаемому значению расхождения.

3. Метод возвращает нормализованное значение расхождения, равное частному `diff` и количеству сравненных пикселей.

Различие двух перегрузок `CalculateDiscrepancy()` заключается в том, что одна из них принимает в виде аргумента ссылку на текстуру тепловой карты в виде нативного массиве из `Color32` и в момент расчета значения каждого из пикселей записывает туда одно из двух значений: цвет `HeatmapColdColor`, если пиксель необходимо пропустить согласно маске или если разность пикселей меньше значения параметра `NoiseFilter`. В ином случае цвет пикселя рассчитывается при помощи линейной интерполяции двух цветов, взяв за начальный цвет параметр `HeatmapColdColor`, за конечный – `HeatmapHotColor`, а за величину интерполяции рассчитанное значение разности пикселей. На рис. 8 приведен пример тепловой карты, полученной с помощью интерполяции черного и белого цветов.

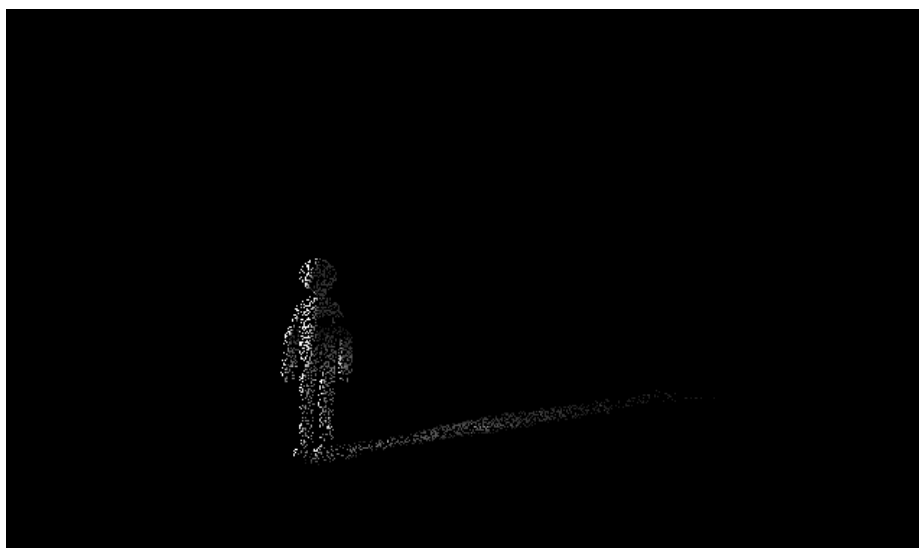


Рис. 8. Пример тепловой карты.

В текущей реализации системы зрения имеются два метода сравнения текстур, где R_1 , G_1 , B_1 – значения каналов RGB для i -го пикселя на 1-й текстуре,

R_2, G_2, B_2 – значения каналов RGB для i -го пикселя на 2-й текстуре, а V – разность двух пикселей:

- простая разность $V = \frac{|R_1 - R_2| + |G_1 - G_2| + |B_1 - B_2|}{3 \cdot 255}$;
- среднеквадратичная разность $V = \frac{(R_1 - R_2)^2 + (G_1 - G_2)^2 + (B_1 - B_2)^2}{3 \cdot 255}$.

После завершения расчета несоответствия текстур система, если этого требует параметр `saveBlurredTextures`, записывает в свойства наблюдателя текстуры, обработанные классом `FastGaussianBlur`, а также тепловую карту, если таковая была создана, все перечисленное может быть выполнено только при синхронизации с главным потоком программы, поэтому используем его лишь при тестировании системы.

Затем полученное значение несоответствия текстур сохраним у наблюдателя при помощи метода `UpdateVisionDiscrepancy()`, также происходит вызов события `TexturesWereUpdated`, и, наконец, наблюдатель возвращается в конец очереди `observerQueue`, завершая тем самым итерацию обновления наблюдателя.

ТЕСТИРОВАНИЕ

Подготовка тестирования

Первая тестовая сцена представляет собой изолированное помещение, специально разработанное для проверки работы алгоритмов обнаружения объектов. Пространство организовано таким образом, чтобы обеспечить контролируемые условия освещения и четко определенные зоны видимости, что крайне важно для точной оценки работы системы зрения.

Основой сцены служит закрытая комната, центральным элементом которой является разделительная стена, создающая четкую границу между освещенными и затемненными участками. В углу комнаты расположен объект `Point Light` с достаточной интенсивностью света для частичного освещения противоположного угла. Такая конфигурация позволяет моделировать различные сценарии обнаружения объектов как в хорошо освещенных зонах, так и в условиях недостаточной видимости (рис. 9).

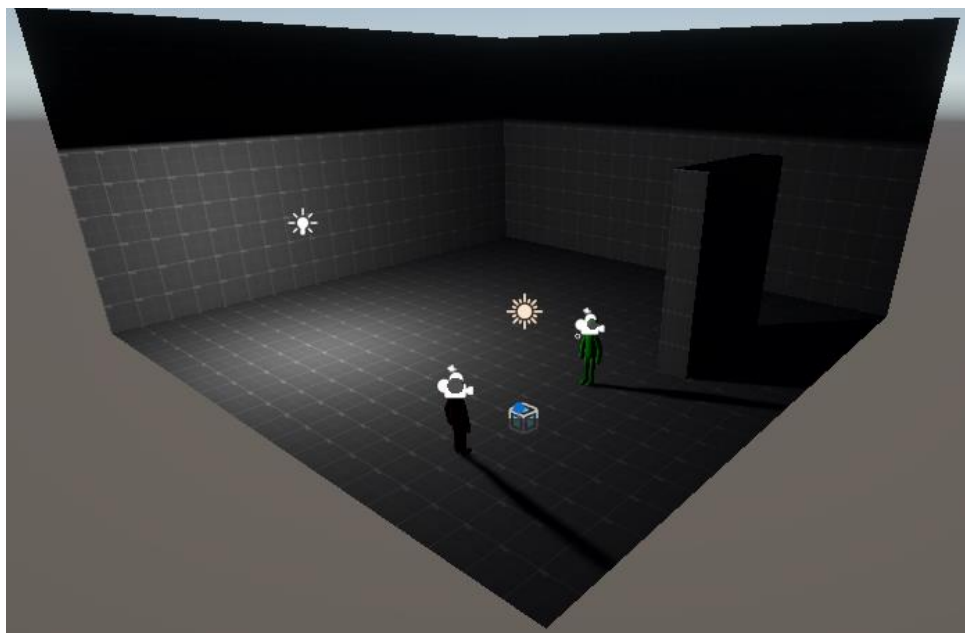


Рис. 9. Простая сцена для тестирования.

Для тестирования были использованы антропоморфные модели, состоящие из комбинации простых геометрических фигур. Модель игрока включает капсуловидное тело и сферическую голову с камерой, расположенной на уровне глаз. Управление персонажем реализовано через стандартный компонент `CharacterController` с дополнительным скриптом `PlayerControl`, обеспечивающим перемещение игрока и вращение камеры.

Особое внимание было уделено настройкам освещения сцены – интенсивность окружающего света специально была снижена до 0.1, а отражения полностью отключены, чтобы убедиться в том, что участки сцены, не освещенные ни одним источником света, будут предельно темными. Настройка `Shadow – Depth Bias` была установлена на значение 0.5, чтобы устранить такой артефакт рендеринга, как «теневой акне».

В качестве второй тестовой сцены, более сложной для отрисовки, был использован бесплатный ассет из `Unity Asset Store` со сценой, содержащей хижину, окруженную лесом. Эта сцена позволяет протестировать видимость при различных условиях, таких как разные уровни освещения, щели между досками хижины и густой туман (рис. 10).



Рис. 10. Сложная сцена для тестирования.

UIManager

Класс UIManager представляет собой центральный управляющий элемент пользовательского интерфейса для системы зрения NPC в Unity. Он тесно взаимодействует с VisionSystem и отдельными наблюдателями (Observer), предоставляя визуализацию и статистику в реальном времени.

Класс поддерживает две основные группы элементов интерфейса: текстовые статистические показатели и визуальные текстуры, дающие обработанное изображение из системы зрения.

В каждом кадре в методе Update() происходит несколько важных процессов. Система рассчитывает среднее значение FPS с помощью взвешенного скользящего среднего, где более свежие значения имеют больший вес. Если включен показ статистики наблюдателя, класс регулярно обновляет UI с заданным интервалом updateCooldown. Класс также реагирует на различные горячие клавиши для переключения визуализации текстур, отображения статистики, переключения тепловой карты и сохранения текущих текстур в файлы.

При изменении целевого наблюдателя через `ChangeTargetedObserver()` метод перенастраивает все связанные элементы интерфейса, включая текстуры и их размеры, а также подписывается на события обновления текстур.

Метод `UpdateObserverStatsUI()` формирует подробную текстовую информацию о текущем состоянии наблюдателя. Это включает расчетное расхождение зрения, процент видимости, наличие прямой видимости, интервал обновления и уровень подозрения для каждой цели. Подозрение отображается в процентном соотношении к пороговому значению для тревоги.

Визуальная часть реализована в `UpdateTextureUI()`, который управляет отображением трех типов текстур: обычного изображения с целями, изображения без целей и тепловой карты. По запросу текстуры могут быть сохранены на диск в формате PNG.

Особенностью класса является разделение логики обновления UI на регулярные интервалы для статистики и мгновенные обновления для текстур по событию. Это позволило снизить нагрузку на процессор при сохранении актуальности визуальной информации.

Результаты тестирования

Тестирование было проведено в сборке приложения при следующих различных параметрах разных уровней нагрузки:

- один, шесть или восемнадцать наблюдателей;
- простая тестовая сцена или сложная;
- разрешение текстур отрисовки: 320 x 180 или 640 x 360;
- размытие включено или выключено для всех.

При всех комбинациях вышеперечисленных параметров были замерены среднее значение FPS, а также время реакции наблюдателей, т. е. время обработки одного наблюдателя. Полученные результаты были занесены в две различные таблицы: статистика FPS (табл. 1) и статистика времени реакции (табл. 2).

Табл. 1. Статистика среднего значения FPS.

Сцена	1 наблюдени е, простая сцена	6 наблюдени й, простая сцена	18 наблюдений , простая сцена	1 наблюдени е, сложная сцена	6 наблюдени й, сложная сцена	18 наблюдений , сложная сцена
320 x 180 без размытия	500	470	400	185	180	170
640 x 360 без размытия	500	500	450	190	175	165
320 x 180 с размытием	300	200	180	150	120	115
640 x 360 с размытием	180	85	80	100	55	55

Чтобы избежать влияния случайного шума, система зрения использовала значения Noise Filter, равное 0.1. Разные значения радиуса размытия наблюдателей не оказали влияния на производительность.

Табл. 2. Статистика среднего времени реакции (в миллисекундах).

Сцена	1 наблюдени е, простая сцена	6 наблюдени й, простая сцена	18 наблюдений , простая сцена	1 наблюдени е, сложная сцена	6 наблюдени й, сложная сцена	18 наблюдений , сложная сцена
320 x 180 без размытия	7	38	137	16	99	310
640 x 360 без размытия	12	45	150	21	103	317
320 x 180 с размытием	19	95	295	29	145	480
640 x 360 с размытием	50	200	700	57	300	850

На основе полученных данных можно сделать следующие выводы:

- увеличение числа наблюдателей умеренно уменьшает среднее значение FPS и линейно увеличивает время реакции каждого из них;

- сложность сцены оказывает сильное влияние на среднее значение FPS и умеренное – на время реакции наблюдателей;
- разрешение текстур отрисовки оказывает умеренное влияние на среднее значение FPS и время реакции без использования размытия и значимое влияние при использовании размытия;
- использование размытия оказывает значимое влияние как на среднее значение FPS, так и на среднее время реакции.

Оценка системы

Основной вывод, вытекающий из проведенных тестов, заключается в следующем: производительность системы предсказуема и зависит от контролируемых параметров, значит, ее легко оптимизировать для целей конкретного проекта.

В среднем система проигрывает стандартному подходу по значению FPS во время игры и по простоте настройки, однако это компенсируется точностью определения степени обнаружения, учетом сложных визуальных эффектов без необходимости программировать специальные условия, а также гибкостью существующих параметров.

Система показала себя наилучшим образом при небольшом числе наблюдателей, значит, идеально подходит для проектов или сцен, где одновременно присутствуют только один или несколько NPC, использующих систему зрения.

Поскольку сцену требуется отрисовывать до трех раз за один кадр, очень важно, чтобы каждая отрисовка происходила быстро, поэтому система лучше всего подходит для проектов с хорошо оптимизированной или простой, стилизованной графикой.

И, что наиболее важно, система помогает больше всего в тех проектах, где необходима точность и реалистичность визуального восприятия персонажей, а не простота. В первую очередь к таким проектам относятся реалистичные симуляторы и игры с глубокими механиками стелса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен новый подход к реализации системы визуального восприятия для неигровых персонажей в видеоиграх. Разработанный алгоритм основан на отрисовке и сравнении двух изображений и учитывает сложные визуальные эффекты, такие как освещение, тени и маскировка, что значительно повышает реализм поведения NPC. Этот алгоритм обеспечивает более реалистичное поведение NPC по сравнению с традиционными методами, особенно в сложных условиях видимости, при этом сохраняя приемлемую производительность.

Предложенный подход может найти применение в различных жанрах видеоигр, особенно в играх с элементами скрытности, где реалистичное визуальное восприятие NPC является критическим фактором для создания увлекательного игрового процесса.

Перспективные пути развития системы включают создание меню отладки для удобства изменения и тестирования параметров в сборках приложения, применение модульного дизайна для упрощения интеграции системы в существующие проекты, использование параллелизации для большей части алгоритма, распределение нагрузки при проверках рейкастами, а также поиск новых способов оптимизации системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Panwar H.* The NPC AI of The Last of Us: A case study // arXiv. 2022. arXiv:2207.00682. P. 1–7.
2. *Mahmoud I., Jaffal Y., Wloka D.* A Vision Simulation Algorithm for Non-Player Character in Static Scene // University of Kassel, Germany Kassel. 2014. P. 1–6.
3. *Vehkala M.* Creating the AI for the Living, Breathing World of Hitman: Absolution. GDC 2013. URL: <https://www.gdcvault.com/play/1019353>
4. *McIntosh T.* The Last of Us: Human Enemy AI. GDC 2014. URL: <https://www.gdcvault.com/play/1020338/The-Last-of-Us-Human>
5. *Walsh M.* Modeling AI Perception and Awareness in Splinter Cell: Blacklist. GDC 2014. URL: <https://youtu.be/RFWrKHM0vAg>
6. *McIntosh T.* Human Enemy AI in The Last of Us. In Game AI Pro 360. CRC Press. 2019. P. 13–24.

7. *Welsh, R.* Crytek's Target Tracks Perception System. In *Game AI Pro: Collected Wisdom of Game AI Professionals*, CRC Press. 2013. P. 403–411.
8. *Walsh M.* Modeling Perception and Awareness in Tom Clancy's Splinter Cell Blacklist // In *Game AI Pro 360*, CRC Press. 2019. P. 73–86.
9. *Ying Z., Edwards N., Kutuzov M.* Efficient Visibility Approximation for Game AI using Neural Omnidirectional Distance Fields // *Proceedings of the ACM on Computer Graphics and Interactive Techniques*. 2024. Vol. 7, No. 1. P. 1–15.
10. *Estgren M.* Modelling NPC perception using supervised learning. Uppsala University, Sweden Uppsala, 2021. 8 p.
11. *Bourg D.M., Seemann G.* AI for Game Developers. O'Reilly Media, Inc. 2004. 371 p.
12. *Примаченко А.М., Хафизов М.Р.* Разработка системы визуального восприятия игровых агентов в видеоиграх // *Электронные библиотеки*. 2025. Т. 28, № 3. С. 506–531.
13. NPC Eyes Sight System – PRO.
URL: <https://www.fab.com/listings/6b54716a-dd21-414d-b78f-384068de14b7>
14. *Erdelyi C.* Using Computer Vision Techniques to Play an Existing Video Game. California State University San Marcos, San Marcos, 2019. 49 p.
15. *Pramod R.T., Katti H., Arun S.P.* Human peripheral blur is optimal for object recognition // *Vision Research*. 2022. Vol. 200. No. 108083.
16. *Jarosz W.* Fast Image Convolutions // *ACM SIGGRAPH University of Illinois Urbana-Champaign*. 2001. 11 p.
17. Fastest Gaussian Blur (in Linear Time).
URL: <https://blog.ivank.net/fastest-gaussian-blur.html>

EVALUATION OF THE PROSPECTIVITY OF A HYBRID MODEL MODELING OF VISUAL PERCEPTION BY GAME AGENTS USING TEXTURE DRAWING

A. M. Primachenko^[0009-0008-6396-2035]

Kazan (Volga region) Federal University, Kazan, Russia

primachenko.artem@mail.ru

Abstract

This article presents a newly developed visual perception algorithm for game agents, implemented in the Unity game engine. The proposed method is based on comparing images from two cameras, taking into account complex visual effects (lighting, shadows, occlusion), and is supplemented by line-of-sight checks, consideration of object velocity, and gradual detection mechanics. The algorithm was optimized using asynchronous computations, dynamic camera activation, and accelerated algorithms. The system was tested under various load levels, and conclusions were drawn regarding the optimal conditions for the algorithm's operation. The paper also analyzes the scientific literature on similar solutions, identifying their strengths and weaknesses. The results can be applied in video game development to create realistic behavior for non-player characters, especially in games with stealth elements.

Keywords: *video games, artificial intelligence, perception system, NPC, Unity, computer vision, game design.*

REFERENCES

1. Panwar H. The NPC AI of The Last of Us: A case study // arXiv. 2022. arXiv:2207.00682. P. 1–7.
2. Mahmoud I., Jaffal Y., Wloka D. A Vision Simulation Algorithm for Non-Player Character in Static Scene // University of Kassel, Germany Kassel. 2014. P. 1–6.
3. Vehkala M. Creating the AI for the Living, Breathing World of Hitman: Absolution. GDC 2013. URL: <https://www.gdcvault.com/play/1019353>
4. McIntosh T. The Last of Us: Human Enemy AI. GDC 2014. URL: <https://www.gdcvault.com/play/1020338/The-Last-of-Us-Human>
5. Walsh M. Modeling AI Perception and Awareness in Splinter Cell: Blacklist. GDC 2014. URL: <https://youtu.be/RFWrKHM0vAg>

6. *McIntosh T.* Human Enemy AI in The Last of Us. In Game AI Pro 360. CRC Press. 2019. P. 13–24.
7. *Welsh, R.* Crytek's Target Tracks Perception System. In Game AI Pro: Collected Wisdom of Game AI Professionals, CRC Press. 2013. P. 403–411.
8. *Walsh M.* Modeling Perception and Awareness in Tom Clancy's Splinter Cell Blacklist // In Game AI Pro 360, CRC Press. 2019. P. 73–86.
9. *Ying Z., Edwards N., Kutuzov M.* Efficient Visibility Approximation for Game AI using Neural Omnidirectional Distance Fields // Proceedings of the ACM on Computer Graphics and Interactive Techniques. 2024. Vol. 7, No. 1. P. 1–15.
10. *Estgren M.* Modelling NPC perception using supervised learning. Uppsala University, Sweden Uppsala, 2021. 8 p.
11. *Bourg D.M., Seemann G.* AI for Game Developers. O'Reilly Media, Inc. 2004. 371 p.
12. *Primachenko A.M., Hafizov M.R.* Development of a Visual Perception System for Game Agents in Video Games // Russian Digital Libraries Journal. 2025. Vol. 28, № 3. P. 506–531.
13. NPC Eyes Sight System – PRO.
URL: <https://www.fab.com/listings/6b54716a-dd21-414d-b78f-384068de14b7>
14. *Erdelyi C.* Using Computer Vision Techniques to Play an Existing Video Game. California State University San Marcos, San Marcos, 2019. 49 p.
15. *Pramod R.T., Katti H., Arun S.P.* Human peripheral blur is optimal for object recognition // Vision Research. 2022. Vol. 200. No. 108083.
16. *Jarosz W.* Fast Image Convolutions // ACM SIGGRAPH University of Illinois Urbana-Champaign. 2001. 11 p.
17. Fastest Gaussian Blur (in Linear Time).
URL: <https://blog.ivank.net/fastest-gaussian-blur.html>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ



ПРИМАЧЕНКО Артем Михайлович – аспирант Института информационных технологий и интеллектуальных систем Казанского федерального университета. Направление исследований: визуальное восприятие игровых агентов в видеоиграх.

Artyom Mikhailovich PRIMACHENKO – PhD student at the Institute of Information Technologies and Intelligent Systems, Kazan Federal University. Research area: visual perception of game agents in video games.

email: primachenko.artem@mail.ru

ORCID: 0009-0008-6396-2035

Материал поступил в редакцию 24 апреля 2026 года

ТЕХНОЛОГИИ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ В МЕДИЦИНСКОМ ОБРАЗОВАНИИ

М. Д. Рахматуллина¹ [0009-0000-4476-8570], Ю. А. Карпеева² [0009-0005-1632-2914]

¹Казанский государственный медицинский университет, г. Казань, Россия

²Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

¹milyaushadamirovna@mail.ru, ²leyaleit@gmail.com

Аннотация

Проведен комплексный анализ применения технологий виртуальной реальности (VR) в системе медицинского образования с особым акцентом на область акушерства и гинекологии. Рассмотрены педагогические основания внедрения VR (конструктивизм, теория опытного обучения Д. Колба, теория когнитивной нагрузки), современные технологические платформы различных уровней иммерсивности, а также география и практика внедрения VR-технологий в ведущих медицинских вузах России и мира. Особое внимание уделено специализированным VR-симуляторам для отработки родовспоможения, неотложных акушерских состояний и малоинвазивных гинекологических вмешательств.

Представлены результаты рандомизированных контролируемых исследований, подтверждающих эффективность VR-тренингов в формировании психомоторных навыков, клинического мышления и командного взаимодействия. Проанализированы основные барьеры внедрения VR: финансовые, технические, кадровые, а также специфические проблемы киберболезни и этические вызовы. Рассмотрены организационные подходы к расширению применения VR: модели коллективного использования оборудования, формирование репозитория верифицированного образовательного контента, интеграция с системами управления обучением. Обоснован потенциал конвергенции VR с искусственным интеллектом для создания адаптивных персонализированных образовательных сред.

Ключевые слова: виртуальная реальность, VR, тренажер, медицинское образование, симуляционное обучение, акушерство и гинекология, иммерсивные технологии, клиническое мышление, психомоторные навыки, киберболезнь, цифровизация образования, искусственный интеллект в обучении.

ВВЕДЕНИЕ

Стремительное развитие цифровых технологий за последнее десятилетие существенно трансформировало систему высшего образования, в том числе медицинского. Иммерсивные технологии, прежде всего виртуальная реальность (VR) и дополненная реальность (AR), рассматриваются как одно из ключевых направлений технологически обогащенного обучения, обеспечивающее повышение вовлеченности обучающихся, улучшение усвоения сложных пространственных и процедурных знаний и расширение форм активного обучения [1, 2].

Особенности медицинского образования делают VR особенно актуальной. Ограничение времени клинических ротаций, рост требований к безопасности пациентов, этические и юридические барьеры для обучения «у постели больного», а также последствия пандемии COVID-19, приведшие к сокращению прямых клинических контактов, усилили потребность в высокореалистичных симуляционных средах [3]. Виртуальная реальность позволяет моделировать широкий спектр клинических сценариев, включая редкие и высокорисковые ситуации, обеспечивая стандартизированное, повторяемое и контролируемое обучение без риска для пациента [4, 5].

Отдельного внимания заслуживает применение VR в акушерстве и гинекологии как одной из наиболее ответственных сфер клинической практики. Недостаток возможностей безопасной отработки родовспоможения и акушерских неотложных состояний делает симуляционное обучение критически важным. Современные исследования показали, что VR-технологии позволяют визуализировать биомеханику родового акта, моделировать динамические изменения положения плода и родовых путей, а также отрабатывать алгоритмы действий при осложнениях [6].

В этих условиях актуальным представляется целостный анализ применения VR в медицинском образовании с акцентом на акушерство и гинекологию: педагогические основания, существующие платформы, доказательства эффективности, барьеры и перспективы внедрения.

1. НАПРАВЛЕНИЕ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ В ОБРАЗОВАНИИ МЕДИЦИНЫ И ЗДРАВООХРАНЕНИЯ

Виртуальная реальность рассматривается как одно из центральных направлений развития технологий, усиливающих медицинское образование на

до- и последипломных этапах [4, 5]. В современных обзорах особо подчеркивается, что VR применяется для формирования как когнитивных, так и процедурных компетенций: от изучения анатомии и клинического мышления до отработки инвазивных манипуляций и командного взаимодействия [1, 7].

1.1. Роль VR в медицинском образовании

Роль VR охватывает весь спектр подготовки (табл. 1): от базового и клинического обучения студентов до программ ординатуры, последипломного образования и непрерывного профессионального развития [5, 8]. В клинической деятельности VR находит применение в предоперационном планировании, тренинге перед высокорисковыми вмешательствами и многопользовательских сценариях. В реабилитации VR-технологии применяют для моторного и когнитивного восстановления, управления болью и тревогой [9].

Табл. 1. Применение VR на этапах непрерывного медицинского образования.

Этап подготовки	Ключевые цели использования VR	Формируемые компетенции
Додипломное образование (студенты медвузов)	Визуализация анатомии и патологии; безопасный переход от теории к клинике	Базовые клинические навыки; пространственное понимание анатомии; эмпатия и коммуникация
Постдипломное образование (ординаторы)	Отработка специализированных алгоритмов; тренинг в условиях высокого риска	Инвазивные манипуляции; принятие решений в экстренных ситуациях; командное взаимодействие (CRM)
НПР и практика (врачи, средний медперсонал)	Поддержание квалификации; освоение новых клинических протоколов	Редкие клинические случаи; работа с новым оборудованием; межпрофессиональное взаимодействие

1.2. Современные VR-платформы в медицинском образовании

Современные VR-платформы в медицинском образовании включают широкий спектр решений (табл. 2): от настольных и неиммерсивных систем до полноценных иммерсивных симуляторов с использованием шлемов виртуальной

реальности (HMD) и хаптической обратной связи [3, 10]. VR сопоставима по образовательным результатам с высокореалистичными манекенами при большей масштабируемости и потенциальной экономической эффективности [10, 11].

Табл. 2. Технологический спектр VR-платформ в медицине.

Тип технологии	Характеристика	Область применения
Настольные/неиммерсивные VR (Desktop VR)	Обычные мониторы, клавиатура/мышь	Виртуальные пациенты, изучение теории, массовое дистанционное обучение
Иммерсивные VR (HMD-based)	Шлемы VR, контроллеры движения (6DoF)	Отработка алгоритмов, работа в обстановке операционной/палаты
VR с хаптической связью	Силовая обратная связь (перчатки, манипуляторы)	Хирургия, стоматология, инвазивные процедуры
Метавселенная и XR	Многопользовательские среды, аватары	Командные тренинги, межпрофессиональное обучение, удаленное наставничество

1.3. География и практика внедрения VR-технологий

Глобальный ландшафт применения VR в медицинском образовании характеризуется неравномерностью: в странах Запада акцент смещен на стандартизацию и интеграцию в учебные планы, тогда как в Азии и России наблюдается активный рост собственных разработок [12, 13]. Изучив опыт США, Европы, Азии и России были определены ключевые факторы влияющие на уровень и масштаб интеграции технологии виртуальной реальности (табл.3).

Северная Америка и Европа остаются лидерами по системному внедрению VR-технологий. В США и Канаде VR-технологии стали де-факто стандартом в симуляционных центрах при крупных университетах. Европейский опыт (Великобритания, Германия, Нидерланды) отличается фокусом на доказательной медицине: VR-курсы проходят валидацию на соответствие национальным клиническим рекомендациям [5].

Азиатский регион демонстрирует уникальный подход, сочетающий VR с искусственным интеллектом (ИИ). В 2024 г. исследователи Университета Цинхуа открыли «Больницу-агент» (Agent Hospital) — полностью виртуальную среду, где роль врачей и пациентов выполняют интеллектуальные агенты на базе больших языковых моделей (LLM) [14, 15]. Интеграция ИИ позволяет масштабировать обучение до уровня, недоступного традиционным методам [16, 17].

В Российской Федерации внедрение VR активно поддерживается ведущими медицинскими вузами и отечественными разработчиками. Компания «Эйдос-Медицина» (Казань) разрабатывает VR-модули для хирургии и гинекологии с тактильной отдачей. Первый МГМУ им. И. М. Сеченова реализует специализированные программы на «Цифровой кафедре», РНИМУ им. Н. И. Пирогова интегрировал VR-комплексы в систему непрерывного медицинского образования (НМО). С 2022 г. VR-станции проходят апробацию в рамках Объективного структурированного клинического экзамена (ОСКЭ). Казанский федеральный университет создал серию VR-тренажеров для обучения хирургическим операциям (трахеостомия, аппендэктомия, краниотомия) [18].

Табл. 3. Факторы успешной интеграции виртуальной реальности (экосистема внедрения).

Компонент экосистемы	Необходимые элементы
Инфраструктура	Аппаратное обеспечение (шлемы, ПК); программное обеспечение (лицензии, обновления); техническая поддержка
Методология	Интеграция в учебные планы; сценарии, соответствующие клиническим рекомендациям; валидированные инструменты оценки
Человеческий капитал	Подготовка преподавателей (фасилитация, дебрифинг); цифровая грамотность студентов; административная поддержка

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ VR В МЕДИЦИНСКОМ ОБРАЗОВАНИИ

Внедрение VR в медицинское образование базируется на фундаментальных педагогических теориях, обосновывающих переход от пассивного восприятия информации к активному конструированию знаний [19, 20]. Доминирующими концепциями, объясняющими эффективность VR, являются конструктивизм, теория опытного обучения Дэвида Колба и теория когнитивной нагрузки [21, 22].

2.1. Педагогические модели

Конструктивистский подход предполагает, что обучающиеся активно формируют знания через взаимодействие со средой. VR создает условия для этого процесса, позволяя манипулировать анатомическими объектами и клиническими сценариями [19]. Теория опытного обучения Колба построена на цикле из четырех этапов: получение конкретного опыта, рефлексивное наблюдение, абстрактная концептуализация и активное экспериментирование. VR поддерживает именно те этапы — «конкретный опыт» и «активное экспериментирование», которые трудно реализовать в традиционной лекционной среде [19, 20].

Табл. 4. Педагогические теории и функциональные возможности VR в медицине.

Педагогическая теория	Ключевой принцип	Реализация в VR-среде
Конструктивизм	Знание конструируется через активное действие	Интерактивная манипуляция инструментами, совершение и исправление ошибок в безопасной среде
Опытное обучение (D. Kolb)	Обучение через цикл «Действие — рефлексия»	Многократное повторение процедуры с последующим мгновенным дебрифингом
Ситуативное обучение	Обучение наиболее эффективно в том контексте, где знания применяются	Высокореалистичный контекст (операционная, палата интенсивной терапии)

Проблемно-ориентированное обучение (PBL)	Обучение через решение открытых проблем	Сценарии виртуальных пациентов с ветвлением, требующие дифференциальной диагностики
--	---	---

Критически важным аспектом проектирования VR является теория когнитивной нагрузки (Cognitive Load Theory, CLT). Согласно CLT, рабочая память человека ограничена и эффективность обучения зависит от баланса трех типов нагрузки: внутренней (сложность материала), внешней (интерфейс, отвлекающие факторы) и релевантной (усилия на осмысление) [21, 22].

Плохо спроектированный VR перегружает студента внешней нагрузкой (сложное управление контроллерами, киберболезнь), оставляя для релевантной обработки информации лишь 10% когнитивных ресурсов. Качественный VR с интуитивным интерфейсом снижает внешнюю нагрузку до 5–10%, высвобождая более 50% ресурсов для непосредственного обучения (табл. 5). Качество UX/UI-дизайна VR-системы представляет собой фундаментальное условие для реализации образовательного потенциала технологии [21, 22].

Табл. 5. Распределение когнитивной нагрузки в VR-системах разного качества.

Параметр	Сценарий А: плохо спроектированный VR	Сценарий Б: качественный VR
Внешняя нагрузка	50% (сложное управление, киберболезнь, непонятный интерфейс)	5–10% (интуитивный интерфейс)
Внутренняя нагрузка	40% (сложность медицинского материала)	40% (сложность медицинского материала)
Релевантная нагрузка	~10% — обучение практически заблокировано	50–55% — эффективное обучение

2.2. Уровни иммерсивности

Эффективность теоретических моделей варьируется в зависимости от уровня иммерсивности (табл. 6). Исследования не всегда подтверждают прямую

корреляцию «чем выше иммерсивность, тем лучше результат»: для базовых знаний анатомии часто достаточно низкоиммерсивных систем, тогда как для хирургических навыков критична высокая иммерсивность с тактильной связью [23].

Табл. 6. Классификация уровней иммерсивности VR-систем.

Уровень	Технологическая база	Область оптимального применения
Низкоиммерсивный (Desktop VR)	Монитор ПК, мышь, клавиатура	Изучение теоретических алгоритмов, виртуальные пациенты, массовое дистанционное обучение
Полуиммерсивный	Большие экраны, проекционные системы (CAVE), 3D-очки	Групповые занятия, демонстрация анатомии в аудитории
Высокоиммерсивный (Fully Immersive)	Шлемы (HMD) + контроллеры, стереоскопическое зрение 360°	Отработка мануальных навыков, стресс-тренинги, хирургические симуляции

3. ПРИМЕНЕНИЕ VR В ОБЛАСТИ АКУШЕРСТВА И ГИНЕКОЛОГИИ

Специфика акушерства и гинекологии требует от специалистов владения тактильно сложными мануальными навыками, способности принимать критические решения в условиях острого дефицита времени и умения работать в мультидисциплинарной команде. Традиционное обучение сталкивается с этическими ограничениями, особенно при редких ургентных состояниях (дистоция плечиков, послеродовые кровотечения) [6]. VR-технологии позволяют визуализировать скрытые биомеханические процессы и обеспечивают безопасную отработку навыков.

3.1. Клинические сценарии и навыки

Применение VR охватывает широкий спектр задач (см. табл. 7), которые можно классифицировать по домену (акушерство/гинекология) и типу навыка. В акушерстве ключевым преимуществом VR является возможность «рентгеновского зрения» – визуализации прохождения плода через родовой канал с одновременным сопоставлением с наружными приемами акушера. 6, 26].

Табл. 7. Ключевые направления применения VR в акушерстве и гинекологии.

Домен	Тип сценария	Отрабатываемые навыки
Акушерство	Физиологические роды	Визуализация биомеханизма родов; оценка раскрытия шейки матки; коммуникация с роженицей
Акушерство	Неотложные состояния	Дистоция плечиков: алгоритм HELPERR; послеродовое кровотечение: командное взаимодействие; кесарево сечение: послойная диссекция тканей
Гинекология	Малоинвазивная хирургия	Лапароскопия: психомоторные навыки (координация глаз-рука); гистероскопия: навигация в полости матки
Гинекология	Амбулаторный прием	Введение ВМС, биопсия шейки матки; консультирование пациентов

3.2. Специализированные платформы и доказательная база

Современный рынок предлагает решения различной степени сложности: неиммерсивные экранные симуляторы (Screen-based), эффективные для когнитивных задач, и полностью иммерсивные системы с тактильной обратной связью (haptics), критически важные для хирургии [24]. Платформы уровня Lucina (AR/VR-манекены), FundamentalVR и VirtaMed позволяют отрабатывать высокоточные движения инструментов с субмиллиметровой точностью.

Рандомизированные контролируемые исследования (РКИ) подтверждают высокую эффективность VR. Врачи, прошедшие VR-тренинг по ведению дистocie плечиков, демонстрировали достоверно лучшее соблюдение алгоритма действий и меньшее время «диагноз – извлечение» по сравнению с группой традиционного обучения [25]. В гинекологии VR-тренинг перед лапароскопическими операциями ассоциирован со снижением интраоперационных ошибок [24]. Симуляции «глазами пациента» повышают уровень осознанности и коммуникативной компетентности персонала [26].

3.3. Преимущества VR-обучения в акушерстве и гинекологии

Внедрение VR в образовательную практику обусловлено рядом фундаментальных преимуществ перед традиционными методами (лекции, пластиковые манекены, обучение на животных) [10, 14]. Эти преимущества можно сгруппировать в три категории (см. табл. 8): дидактические, экономические и клинические.

Табл. 8. Преимущества VR-обучения.

Клиническая безопасность	Дидактическое качество	Организационная эффективность
«Право на ошибку»: студент может совершить фатальную ошибку в VR, чтобы не совершить ее в жизни	Визуализация невидимого: «рентгеновское зрение» — просмотр биомеханизма родов изнутри	Доступность редких случаев: гарантированная встреча с патологией (эклампсия, дистocie)
Нулевой риск для пациента при отработке навыков	Объективная оценка: точность движений, тремор и время реакции без предвзятости	Стандартизация опыта: одинаково качественный сценарий для всех студентов
Снижение стресса: адаптация к критическим ситуациям до выхода в клинику	Осознанная практика (Deliberate Practice): неограниченное число повторений	Экономия ресурсов на расходных материалах и времени преподавателей

Сравнительный анализ методов обучения (табл. 9) показал ключевые преимущества VR перед традиционными форматами с точки зрения доступности

редких клинических случаев, анатомической наглядности, характера обратной связи и логистики.

Формирование практических навыков и психомоторики. Ключевое преимущество VR-симуляции — возможность выработки мышечной памяти без риска для пациента. В отличие от пассивного наблюдения за клинической манипуляцией, симуляционная среда требует от обучающегося активного принятия решений на каждом этапе. Система автоматически регистрирует объективные параметры выполнения: траекторию движения инструментов, силу давления на ткани, время прохождения каждого этапа — что исключает субъективность оценки со стороны экзаменатора. По данным ряда исследований, кривая освоения навыка (learning curve) при VR-обучении имеет более высокий градиент, позволяя обучающимся достигать порогового уровня компетентности в более короткие сроки [27, 29].

Обеспечение безопасности и формирование культуры анализа ошибок. В акушерстве цена ошибки может иметь фатальные последствия для жизни матери и плода. VR создаёт контролируемую среду («sandbox»), в которой ошибка не только допустима, но и методически необходима: обучающийся многократно воспроизводит критические манипуляции — наложение акушерских щипцов, тракцию при осложнённых предлежаниях — наблюдает смоделированные последствия и корректирует тактику. Такой подход снижает тревожность перед реальной клинической практикой и повышает уверенность специалиста в нестандартных ситуациях [14].

Развитие навыков командного взаимодействия (CRM). Неотложные акушерские состояния — массивное кровотечение, эклампсия — требуют слаженных действий мультидисциплинарной бригады. Многопользовательские VR-платформы (multi-user VR) обеспечивают совместную работу акушера, анестезиолога и акушерки в едином виртуальном пространстве вне зависимости от их физического расположения. Это позволяет целенаправленно отрабатывать компетенции Crisis Resource Management (CRM): лидерство в кризисной ситуации, распределение ролей и замкнутый цикл коммуникации — элементы, практически не реализуемые в рамках традиционного аудиторного обучения [31].

Сравнительный анализ методов обучения (табл. 9) показал ключевые преимущества VR перед традиционными форматами с точки зрения доступности

редких клинических случаев, анатомической наглядности, характера обратной связи и логистики.

Табл. 9. Сравнительный анализ эффективности методов обучения.

Параметр	Традиционное обучение	VR-обучение
Доступность редких случаев	Ограничена (зависит от потока пациентов)	Гарантирована. Любой сценарий доступен по запросу
Анатомическая наглядность	Статичные атласы или жесткие манекены	Динамическая 3D-визуализация в реальном времени
Обратная связь	Отсроченная, субъективная (от преподавателя)	Мгновенная, объективная (система подсказывает ошибки)
Логистика	Требует присутствия преподавателя и расходных материалов	Автономная работа студента, экономия на биологических моделях

4. ПРОБЛЕМЫ И ОГРАНИЧЕНИЯ ВНЕДРЕНИЯ VR В МЕДИЦИНСКОМ ОБРАЗОВАНИИ

Несмотря на доказанную эффективность, полномасштабная интеграция VR сталкивается с рядом существенных барьеров, которые можно разделить на три группы: технико-экономические, физиолого-психологические и организационно-этические [13, 20].

Табл. 10. Сравнительный анализ барьеров внедрения VR.

Категория барьера	Суть проблемы	Возможные пути решения
Финансовые	Высокая стоимость HMD-гарнитур и разработки сценариев; необходимость регулярного обновления оборудования	Использование моделей подписки (SaaS); создание межуниверситетских консорциумов для совместного использования контента
Технические	Сложности интеграции VR в LMS вуза; низкое качество	Переход на автономные шлемы (Standalone VR); стандартизация

	графики в дешевых симуляторах	API для медицинских симуляторов
Кадровые	Цифровая неграмотность преподавателей; сопротивление изменениям	Программы подготовки преподавателей (Train-the-Trainer); введение должности технического фасилитатора

4.1. Технические, финансовые и кадровые барьеры

Основным препятствием является высокая начальная стоимость внедрения. Исследования показали, что VR становится экономически выгоднее традиционного обучения при охвате более 375 обучающихся, однако стартовые инвестиции в оборудование и лицензирование контента остаются непосильными для региональных вузов [27, 13]. Дополнительную нагрузку создают отсутствие стандартизированных методических руководств и необходимость постоянной технической поддержки [12, 13].

4.2. Физиологические и психологические аспекты (киберболезнь)

Специфической проблемой иммерсивной VR является киберболезнь, симптомы тошноты, головокружения, дезориентации, которые испытывают от 22% до 80% пользователей. Феномен обусловлен сенсорным конфликтом между зрительной системой и вестибулярным аппаратом [28, 29]. Клиническими предикторами киберболезни являются возраст старше 40 лет, высокий уровень тревожности и сложность сценария [30]. В контексте акушерских симуляций, требующих точных мануальных действий, симптомы киберболезни могут снижать когнитивные способности и искажать результаты оценки [31, 29].

4.3. Этические и нормативные вызовы

Этические проблемы VR-обучения связаны с глубоким эмоциональным воздействием иммерсивной среды. Высокая реалистичность сценариев может вызывать у неподготовленных студентов психологический дистресс, требующий дебрифинга [20, 32]. Существует также риск формирования «игрового» отношения к пациенту при отсутствии сопровождающей рефлексии. Открытым остается вопрос конфиденциальности биометрических данных, собираемых VR-гарнитурами, защита которых пока слабо регламентирована [32].

Успешное внедрение VR требует комплексного подхода: разработки протоколов безопасности (ограничение сессий до 20–30 мин), этических кодексов использования симуляций и программ адаптации преподавателей.

5. АРХИТЕКТУРА СОВРЕМЕННЫХ VR-ТРЕНАЖЕРОВ ДЛЯ МЕДИЦИНСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ

Эффективность VR-тренажеров определяется не только качеством визуализации, но и архитектурой системы управления учебным процессом. Анализ современных платформ выявил конвергенцию к многорежимной архитектуре, обеспечивающей постепенное наращивание сложности при снижении уровня поддержки системы [33].

5.1. Функциональные режимы обучения

Типовая архитектура реализует принцип «постепенного снятия поддержки» (scaffolding) и включает следующие четыре последовательных режима.

- Калибровочный режим адаптирует интерфейс к индивидуальным характеристикам пользователя, что критично для последующей объективной оценки навыков [8, 24].
- Демонстрационный режим использует записанные траектории экспертов с возможностью изменения ракурса и замедления. Просмотр ключевых моментов манипуляции сокращает время освоения навыка по сравнению с наблюдением только внешних движений [33].
- Управляемое выполнение предполагает активное участие обучающегося при постоянной коррекции через визуальные подсказки, аудиосигналы и тактильную обратную связь. Критерием перехода к следующему режиму является достижение порогового уровня точности [11, 24].
- Автономное выполнение моделирует реальные условия без подсказок. Система пассивно регистрирует действия и детектирует критические ошибки (чрезмерное усилие, нарушение протокола), принудительно останавливая сценарий при их обнаружении [7, 16].

Аналитический режим обеспечивает визуализацию записанных данных с синхронным воспроизведением действий обучающегося и эталонной модели эксперта. Система классифицирует ошибки и генерирует персонализированные рекомендации [17, 34].

5.2. Технологический стек разработки VR-тренажеров

Доминирующими платформами разработки являются Unity (C#) и Unreal Engine (C++). Unity занимает лидирующие позиции благодаря обширной экосистеме и нативной поддержке XR через пакет XR Interaction Toolkit; Unreal Engine выбирается для проектов, требующих фотореалистичной визуализации анатомических структур [13, 15]. Кроссплатформенная разработка обеспечивается стандартом OpenXR 1.0, унифицирующим API для взаимодействия с различными VR-гарнитурами (Meta Quest, Pico, HTC Vive).

Физическое моделирование мягких тканей реализуется методами конечных элементов (FEM), mass-spring-системами или position-based dynamics (PBD). Для акушерских симуляторов расчет биомеханических взаимодействий плода с родовым каналом должен выполняться не более чем за 10–15 мс на кадр для поддержания 90 кадров/с [24, 35].

Интеграция тактильной обратной связи реализуется через специализированные устройства (Geomagic Touch, HaptX Gloves). Пространственный звук критичен для создания реалистичной акустической среды операционной или родильного зала [15, 24].

5.3. Модуль мониторинга и система оценки

Параллельно с пользовательским интерфейсом функционирует канал данных для инструктора, включающий визуализацию текущего положения рук обучающегося, панель метрик качества и возможность ручной остановки сценария [36].

Система автоматической оценки реализует многоуровневую обработку данных с частотой 90–120 Гц. Интегральная оценка формируется как взвешенная сумма временных, кинематических метрик, метрик взаимодействия с анатомией и метрик соблюдения протокола. На ее основе система автоматически классифицирует уровень навыка [17, 34].

5.4. Интеграция с системами управления обучением

VR-тренажеры функционируют как компоненты более широкой учебной экосистемы и требуют интеграции с системами управления обучением (Learning Management Systems, LMS). Типовой протокол включает аутентификацию поль-

зователя, экспорт данных сессии в LMS и автоматизированное определение готовности к переходу на следующий этап [12, 36]. Рекомендуемая последовательность: теоретический модуль в LMS → калибровка и демонстрация в VR → управляемое выполнение → отработка на манекене → автономное выполнение в VR → клиническая практика.

5.5. Параметры сессий и когнитивная нагрузка

На основе исследований когнитивной нагрузки и проблемы киберболезни определены рекомендуемые параметры работы: длительность непрерывной сессии для начального уровня 20–30 мин, для продвинутого до 45 мин; оптимальная периодичность занятий 2–3 раза в неделю с минимальным интервалом 24 ч для консолидации моторной памяти [20, 28].

6. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ И ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ К ВНЕДРЕНИЮ

Интеграция VR в систему медицинского образования России находится на этапе перехода от точечных экспериментов к системному внедрению. Перспективы развития связаны с созданием гибридных образовательных сред, объединяющих VR с ИИ, и с расширением нормативного признания цифровых симуляций [16, 17]. Постепенное включение VR-модулей в структуру образовательных программ, особенно в части отработки навыков высокого риска, представляется обоснованным направлением развития [12, 35].

6.1. Модели финансирования и инфраструктура

Основным барьером остается высокая стоимость оснащения. Для преодоления финансового разрыва целесообразен переход от модели «каждый вуз закупает самостоятельно» к сетевым формам взаимодействия. В табл. 11 систематизированы возможные пути решения проблем развития VR.

Табл. 11. Организационные подходы к развитию VR в медвузах.

Компонент	Текущая проблема	Возможный подход
Оборудование	Устаревание парка ПК каждые 3–4 года; проводные системы ограничивают мобильность	Переход на автономные шлемы (Standalone VR) с облачным рендерингом
Контент	Разрозненные сценарии низкого качества; отсутствие валидации	Развитие централизованных репозиторий верифицированного контента; сетевое взаимодействие вузов
Кадры	Дефицит преподавателей, владеющих методикой VR-дебрифинга	Включение модуля «Цифровая дидактика» в программы повышения квалификации ППС

Перспективной является модель «Центров коллективного пользования» (VR-Hubs), обслуживающих несколько региональных вузов. Финансирование может осуществляться через грантовые программы и государственно-частное партнерство с производителями медоборудования [12, 37].

6.2. Расширение доступа и мониторинг качества

Для региональных вузов VR становится инструментом выравнивания качества образования: студент в удаленном регионе получает доступ к той же виртуальной операционной, что и студент столичного центра. Внедрение аналитики данных (Learning Analytics) позволяет мониторить прогресс обучения студентов на основе объективных показателей точности движений, времени реакции, тремора рук [37].

Целесообразна разработка методических рекомендаций по учету часов VR-симуляции в трудоемкости производственной практики, а также формирование требований к валидности медицинских VR-сценариев в части соответствия клиническим рекомендациям. Включение VR как дополнительного инструмента «претренинга» перед клинической практикой согласуется с принципами доказательного симуляционного обучения [38].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показал, что технологии виртуальной реальности перешли из разряда инновационных экспериментов в статус доказательного инструмента профессиональной подготовки [1, 4]. VR реализует принципы конструктивизма и опытного обучения, предоставляя обучающимся возможность активного взаимодействия с клинической средой без риска для пациента [19].

В акушерстве и гинекологии VR-технологии исключительно важны. Высокие риски материнской и перинатальной смертности, а также этическая невозможность обучения на реальных пациентах в критических ситуациях делают симуляцию необходимым элементом подготовки специалистов [6, 25]. Современные иммерсивные платформы с тактильной обратной связью позволяют визуализировать скрытые биомеханические процессы родов и формировать устойчивую мышечную память, что подтверждается данными РКИ [25, 33].

Широкое внедрение VR сдерживается рядом барьеров: экономической нагрузкой на закупку оборудования, дефицитом квалифицированных преподавателей и проблемами киберболезни. Расширение практики сетевого взаимодействия вузов, развитие централизованных репозиториев верифицированных сценариев и методическая подготовка преподавательского состава являются необходимыми условиями системного внедрения технологии [12, 13].

Будущее медицинского образования неразрывно связано с конвергенцией VR и искусственного интеллекта, открывающей возможности для создания адаптивных персонализированных образовательных сред [16, 17]. Расширение практики признания результатов виртуальной симуляции в системе аккредитации специалистов представляется перспективным направлением, способствующим трансформации потенциала VR в реальное повышение качества медицинской помощи.

Благодарности

Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского государственного медицинского университета («ПРИОРИТЕТ-2030»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tene T., Vique López D.F., Valverde Aguirre P.E., Orna Puente L.M., Vacacela Gomez C. Virtual Reality and Augmented Reality in Medical Education: An Umbrella Review // *Front. Digit. Health*. 2024. Vol. 6. Art. 1365345.
<https://doi.org/10.3389/fdgth.2024.1365345>
2. Mørk G., Bonsaksen T., Larsen O.S., Kunnikoff H.M., Lie S.S. Virtual Reality Simulation in Undergraduate Health Care Education Programs: Usability Study // *JMIR Med. Educ*. 2024. Vol. 10, No. 1. Art. e56844. <https://doi.org/10.2196/56844>
3. Al-Balas M., Al-Balas H.I., Jaber H.M., Obeidat K., Al-Balas H., Aborajoo E.A., Al-Taher R., Al-Balas B. Distance Learning in Clinical Medical Education Amid COVID-19 Pandemic in Jordan: Current Situation, Challenges, and Perspectives // *BMC Med. Educ*. 2020. Vol. 20. Art. 341. DOI: 10.1186/s12909-020-02257-4
4. Liu Y.Q. Virtual Reality: The Bridge Between Medical Education and Clinical Practice // *World J. Clin. Cases*. 2024. Vol. 12, No. 32. P. 6575–6579.
<https://doi.org/10.12998/wjcc.v12.i32.6575>
5. Lie S.S., Helle N., Sletteland N.V., Vikman M.D., Bonsaksen T. Implementation of Virtual Reality in Health Professions Education: A Scoping Review // *JMIR Med. Educ*. 2023. Vol. 9, No. 1. Art. e41589. <https://doi.org/10.2196/41589>
6. Visan I.G., Toma C.V., Petca R., Petrescu G.E.D., Noditi A.-R., Petca A. Exploring the Efficacy of Virtual Reality Training in Obstetric Procedures and Patient Care—A Systematic Review // *Healthcare*. 2025. Vol. 13, No. 7. Art. 784.
<https://doi.org/10.3390/healthcare13070784>
7. Talan J., Forster M., Joseph L., Pradhan D. Exploring the Role of Immersive Virtual Reality Simulation in Health Professions Education: Thematic Analysis // *JMIR Med. Educ*. 2025. Vol. 11, No. 1. Art. e62803. <https://doi.org/10.2196/62803>
8. Nyiramana Mukamurera P. The Use of Virtual Reality in Medical Training // *Res. Output J. Biol. Appl. Sci*. 2024. Vol. 4, No. 1. P. 12–15.
<https://doi.org/10.59298/ROJBAS/2024/411215>
9. Zhou S., Gromala D., Wang L. Ethical Challenges of Virtual Reality Technology Interventions for the Vulnerabilities of Patients With Chronic Pain: Exploration of Technician Responsibility // *J. Med. Internet Res*. 2023. Vol. 25. Art. e49237.
<https://doi.org/10.2196/49237>
10. Foronda C.L., Gonzalez L., Meese M.M., Slamon N., Baluyot M., Lee J., Aebersold M. A Comparison of Virtual Reality to Traditional Simulation in Health Professions

Education: A Systematic Review // *Simul. Healthc.* 2024. Vol. 19, No. 1S. P. S90–S97.
<https://doi.org/10.1097/SIH.0000000000000745>

11. *Jiang Z., Hang H., Wu X., Xiang S., Pan S.* Methodological Innovation in Evaluating the Cost-Effectiveness of Simulation Training Combining Transfer Effectiveness and Change-Point Analysis // *J. Med. Educ. Curric. Dev.* 2025. Vol. 12. Art. 23821205251368247. <https://doi.org/10.1177/23821205251368247>

12. *Mojtahedzadeh R., Najimi A., Alizadeh M., Mohammadi A.* Identifying Key Drivers Affecting the Future of Virtual Reality in Medical Education: An Anticipated Framework // *J. Educ. Health Promot.* 2025. Vol. 14. Art. 97.
https://doi.org/10.4103/jehp.jehp_1874_23

13. *Abbas J.R., Gantwerker E., Volk M., Payton T., McGrath B.A., Tolley N., Isba R., Bruce I.A.* Describing, Evaluating, and Exploring Barriers to Adoption of Virtual Reality: An International Modified Delphi Consensus Study // *J. Med. Extended Reality.* 2024. Vol. 1, No. 1. P. 202–214. <https://doi.org/10.1089/jmxr.2024.0022>

14. 'World's First' AI Hospital with Virtual Doctors Opens in China // *Robotics & Automation* [Электронный ресурс]. URL: <https://www.roboticsandautomationmagazine.co.uk/news/healthcare/worlds-first-ai-hospital-with-virtual-doctors-opens-in-china.html>

15. China Opens 1st AI Hospital Town to Treat Patients in Virtual World // *Anadolu Agency* [Электронный ресурс]. URL: <https://www.aa.com.tr/en/artificial-intelligence/china-opens-1st-ai-hospital-town-to-treat-patients-in-virtual-world/3234256>

16. *Mallek F., Mazhar T., Shah S.F.A., Ghadi Y.Y., Hamam H.* A Review on Cultivating Effective Learning: Synthesizing Educational Theories and Virtual Reality for Enhanced Educational Experiences // *PeerJ Comput. Sci.* 2024. Vol. 10. Art. e2000.
<https://doi.org/10.7717/peerj-cs.2000>

17. *Goswami S., Badwaik G., Borka A., Deshmukh P.* Integration of Artificial Intelligence and Virtual Reality in Undergraduate Medical Education: A Review of Emerging Trends and Applications // *Eur. J. Cardiovasc. Med.* 2025. Vol. 15, No. 6. P. 219–221.

18. *Шараева Р.А., Кузурасова В.В., Галиева Р.Р., Зинченко С.В.* Подходы к проектированию виртуальных тренажеров хирургических операций // *Электронные библиотеки.* 2022. Т. 25, № 5. С. 489–532.
<https://doi.org/10.26907/1562-5419-2022-25-5-489-532>

19. *Abbas Shah S.F., Mazhar T., Shahzad T., Khan M.A., Ghadi Y.Y., Hamam H.* Integrating Educational Theories with Virtual Reality: Enhancing Engineering Education and VR Laboratories // *Soc. Sci. Humanit. Open.* 2024. Vol. 10. Art. 101207. <https://doi.org/10.1016/j.ssaho.2024.101207>

20. *Kaggwa M.M., Agboinghale P., Marginean D., Chaimowitz G.A., Olagunju A.T.* Embracing Virtual Reality in Medical Education // *Discov. Educ.* 2025. Vol. 4. Art. 129. <https://doi.org/10.1007/s44217-025-00543-1>

21. *Smith C., Rafferty K., Sharma V., Rainey E.* Effective Mitigation of Cognitive Load in Complex Mixed Reality Tasks // *Proceedings of the 20th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications (VISIGRAPP 2025).* 2025. Vol. 1. P. 506–517. <https://doi.org/10.5220/0013373700003912>

22. *De Witte B., Reynaert V., Kieken D., Jabbour J., Demarey C., Dumoulin A., Possik J.* Immersive Virtual Reality Learning and Cognitive Load: A Multiple-Day Field Study // *Comput. Hum. Behav.* 2026. Vol. 176. Art. 108853. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2025.108853>

23. *Pearson M., Khatiwada N., Chilaka D.A.U., Omid F.* Integration of Immersive Virtual Environments (IVEs) in Healthcare Research and Design // *European Healthcare Design [Электронный ресурс]*. URL: <https://www.european-healthcaredesign.eu/news-media/integration-of-immersive-virtual-environments-ives-in-healthcare-research-and-design> (дата обращения: 20.02.2026)

24. *Azher S., Mills A., He J., Hyjazie T., Tokuno J., Quaiattini A., Harley J.M.* Findings Favor Haptics Feedback in Virtual Simulation Surgical Education: An Updated Systematic and Scoping Review // *Surg. Innov.* 2024. Vol. 31, No. 3. P. 331–341. <https://doi.org/10.1177/15533506241238263>

25. *Falcone V., Catic A., Heinzl F., Steinbauer P., Wagner M., Mikula F., Dorittke T., Roessler B., Farr A.* Impact of a Virtual Reality-Based Simulation Training for Shoulder Dystocia on Human and Technical Skills Among Caregivers: A Randomized-Controlled Trial // *Sci. Rep.* 2024. Vol. 14. Art. 7898. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-57785-6>

26. *Raposo R., Vairinhos M., Laska-Leśniewicz A., Sztobryn-Giercuskiewicz J.* Increasing Awareness and Empathy Among University Students Through Immersive Exercises – Testing of the Virtual Reality Application: A Pilot Study // *Med. Pr.* 2023. Vol. 74, No. 3. P. 187–197. <https://doi.org/10.13075/mp.5893.01391>

27. *Mergen M., Graf N., Meyerheim M.* Reviewing the Current State of Virtual Reality Integration in Medical Education – A Scoping Review // BMC Med. Educ. 2024. Vol. 24. Art. 788. <https://doi.org/10.1186/s12909-024-05777-5>

28. VR Cybersickness in Healthcare Simulation: Causes, Mitigation, and Impact // HealthySimulation.com [Электронный ресурс]. URL: <https://www.healthysimulation.com/vr-cybersickness-healthcare-simulation/> (дата обращения: 21.04.2025)

29. *Ng A., Inagaki M., Antinucci R., Sockalingam S., Abdool P.S.* Determining the Severity and Prevalence of Cybersickness in Virtual Reality Simulations in Psychiatry // Adv. Simul. 2025. Vol. 10. Art. 32. <https://doi.org/10.1186/s41077-025-00358-y>

30. *Kim H., Kim D.J., Chung W.H., Park K.-A., Kim J.D.K., Kim D., Kim K., Jeon H.J.* Clinical Predictors of Cybersickness in Virtual Reality (VR) Among Highly Stressed People // Sci. Rep. 2021. Vol. 11. Art. 12139. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-91573-w>

31. *Li M.* A Comprehensive Review of Virtual Reality in Medical Education // Proceedings of the 2024 International Conference on Education and Multimedia Technology (ICEMT). Atlantis Press, 2024. P. 71–76.

32. *Liu S., Yang J., Zhang C., Zhang J., Wang Q., Zhou R., Zhao Z., Ren S., Yi H., Guo H., Xia J.* Use of a Nonimmersive Virtual Reality System for Clinical Thinking in Obstetric Nursing Education: Mixed Methods Study // J. Med. Internet Res. 2025. Vol. 27. Art. e80951. <https://doi.org/10.2196/80951>

33. *Kane D., Ryan G., Mangina E., McAuliffe F.M.* A Randomized Control Trial of a Virtual Reality Learning Environment in Obstetric Medical Student Teaching // Int. J. Med. Inform. 2022. Vol. 168. Art. 104899. <https://doi.org/10.1016/j.ijmedinf.2022.104899>

34. В Сеченовском университете запустили новый образовательный курс по разработке решений виртуальной и дополненной реальности в медицине // Официальный портал Сеченовского университета [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sechenov.ru/pressroom/news/v-sechenovskom-universitete-zapustili-novyy-obrazovatelnyy-kurs-po-razrabotke-resheniy-virtualnoy-i-/> (дата обращения: 04.08.2025)

35. *Esmaeeli E., Soleimani A., Khorashadizadeh M.S., Shahmoradi L., Nekoonam S., Rezayi S.* A Practical Framework for Developing a Virtual Reality-Based Anatomy Education Application: Key Content and Technical Requirements // Sci. Rep. 2025. Vol. 15. Art. 12536. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-96074-8>

36. Лопанчук П.А., Гущин А.В., Ануров М.В., Корнеева Е.В. Интеграция симуляционного обучения в медицинское образование: опыт РНИМУ им. Н.И. Пирогова // Методология и технология непрерывного профессионального образования. 2023. Т. 4, № 16. С. 15–45.

37. VR Training in 2025: Benefits, Best Practices & Industry Use Cases // YORD Studio Blog [Электронный ресурс]. URL: <https://yordstudio.com/vr-training-in-2025-benefits-best-practices-and-industry-use-cases/> (дата обращения: 16.09.2025)

38. Xpeer. Future of Medical Education: AI, VR & Microlearning // LinkedIn [Электронный ресурс]. URL: https://www.linkedin.com/posts/xpeercmc_future-of-medical-education-ai-vr-microlearning-activity-7394682957111857152-SGpG (дата обращения: 21.06.2026)

39. Siddiqui M.F., Jabeen S., Alwazzan A., Vacca S., Dalal L., Al-Haddad B., Jaber A., Ballout F.F., Abou Zeid H.K., Haydamous J., El Hajj Chehade R., Kalmatov R. Integration of Augmented Reality, Virtual Reality, and Extended Reality in Healthcare and Medical Education: A Glimpse into the Emerging Horizon in LMICs—A Systematic Review // J. Med. Educ. Curric. Dev. 2025. Vol. 12. Art. 23821205251342315. <https://doi.org/10.1177/23821205251342315>

40. Li Q., Duan H., Zhou X., Sun X., Tao L., Lu X. The Use of Metaverse in Medical Education: A Systematic Review // Clin. Med. 2025. Vol. 25. Art. 100315. <https://doi.org/10.1016/j.clinme.2025.100315>

41. Setiawan I., Suhoyo Y., Widyandana D., Emilia O. Comparison of Virtual Reality and Mannequin-based Postpartum Hemorrhage Training: A Randomized Controlled Trial // Open Nurs. J. 2025. Vol. 19. Art. e18744346426336. <https://doi.org/10.2174/0118744346426336251001074230>

VIRTUAL REALITY TECHNOLOGIES IN MEDICAL EDUCATION

M. D. Rakhmatullina¹ [0009-0000-4476-8570], Yu. A. Karpeeva² [0009-0005-1632-2914]

¹Kazan Medical University, Kazan, Russia

²Kazan (Volga region) Federal University, Kazan, Russia

¹milyaushadamirovna@mail.ru, ²leyaleit@gmail.com

Abstract

This article presents a comprehensive analysis of the application of virtual reality (VR) technologies in medical education, with a particular focus on obstetrics and gynecology. It examines the pedagogical rationale for introducing VR (constructivism, Kolb's experiential learning theory, cognitive load theory), modern technological platforms with varying levels of immersion, as well as the geography and practice of introducing VR technologies in leading medical universities in Russia and around the world. Particular attention is paid to specialized VR simulators for practicing obstetric care, emergency obstetric conditions (shoulder dystocia, postpartum hemorrhage), and minimally invasive gynecological interventions. The results of randomized controlled studies confirming the effectiveness of VR training in the formation of psychomotor skills, clinical thinking, and team interaction are presented. The main barriers to the implementation of VR are analyzed: financial, technical, personnel, as well as specific problems of cyber sickness and ethical challenges. Organizational approaches to expanding the use of VR are reviewed: models for the collective use of equipment, the development of verified educational content repositories, and integration with learning management systems. The potential for convergence of VR with artificial intelligence (AI) to create adaptive, personalized educational environments is substantiated.

Keywords: *virtual reality, VR, simulator, medical education, simulation-based learning, obstetrics and gynecology, immersive technologies, clinical thinking, psychomotor skills, cybersickness, digitization of education, artificial intelligence in education.*

Acknowledgment

This paper has been supported by the Kazan Federal University Strategic Academic Leadership Program («PRIORITY-2030»).

REFERENCES

1. Tene T., Vique López D.F., Valverde Aguirre P.E., Orna Puente L.M., Vacacela Gomez C. Virtual Reality and Augmented Reality in Medical Education: An Umbrella Review // *Front. Digit. Health*. 2024. Vol. 6. Art. 1365345. <https://doi.org/10.3389/fdgth.2024.1365345>
2. Mørk G., Bonsaksen T., Larsen O.S., Kunnikoff H.M., Lie S.S. Virtual Reality Simulation in Undergraduate Health Care Education Programs: Usability Study // *JMIR Med. Educ*. 2024. Vol. 10, No. 1. Art. e56844. <https://doi.org/10.2196/56844>
3. Al-Balas M., Al-Balas H.I., Jaber H.M., Obeidat K., Al-Balas H., Aborajoo E.A., Al-Taher R., Al-Balas B. Distance Learning in Clinical Medical Education Amid COVID-19 Pandemic in Jordan: Current Situation, Challenges, and Perspectives // *BMC Med. Educ*. 2020. Vol. 20. Art. 341. <https://doi.org/10.1186/s12909-020-02257-4>
4. Liu Y.Q. Virtual Reality: The Bridge Between Medical Education and Clinical Practice // *World J. Clin. Cases*. 2024. Vol. 12, No. 32. P. 6575–6579. <https://doi.org/10.12998/wjcc.v12.i32.6575>
5. Lie S.S., Helle N., Sletteland N.V., Vikman M.D., Bonsaksen T. Implementation of Virtual Reality in Health Professions Education: A Scoping Review // *JMIR Med. Educ*. 2023. Vol. 9, No. 1. Art. e41589. <https://doi.org/10.2196/41589>
6. Visan I.G., Toma C.V., Petca R., Petrescu G.E.D., Noditi A.-R., Petca A. Exploring the Efficacy of Virtual Reality Training in Obstetric Procedures and Patient Care—A Systematic Review // *Healthcare*. 2025. Vol. 13, No. 7. Art. 784. <https://doi.org/10.3390/healthcare13070784>
7. Talan J., Forster M., Joseph L., Pradhan D. Exploring the Role of Immersive Virtual Reality Simulation in Health Professions Education: Thematic Analysis // *JMIR Med. Educ*. 2025. Vol. 11, No. 1. Art. e62803. <https://doi.org/10.2196/62803>
8. Nyiramana Mukamurera P. The Use of Virtual Reality in Medical Training // *Res. Output J. Biol. Appl. Sci*. 2024. Vol. 4, No. 1. P. 12–15. <https://doi.org/10.59298/ROJBAS/2024/411215>
9. Zhou S., Gromala D., Wang L. Ethical Challenges of Virtual Reality Technology Interventions for the Vulnerabilities of Patients With Chronic Pain: Exploration of Technician Responsibility // *J. Med. Internet Res*. 2023. Vol. 25. Art. e49237. <https://doi.org/10.2196/49237>
10. Foronda C.L., Gonzalez L., Meese M.M., Slamon N., Baluyot M., Lee J., Aebersold M. A Comparison of Virtual Reality to Traditional Simulation in Health Professions

Education: A Systematic Review // *Simul. Healthc.* 2024. Vol. 19, No. 1S. P. S90–S97.
<https://doi.org/10.1097/SIH.0000000000000745>

11. Jiang Z., Hang H., Wu X., Xiang S., Pan S. Methodological Innovation in Evaluating the Cost-Effectiveness of Simulation Training Combining Transfer Effectiveness and Change-Point Analysis // *J. Med. Educ. Curric. Dev.* 2025. Vol. 12. Art. 23821205251368247. <https://doi.org/10.1177/23821205251368247>

12. Mojtahedzadeh R., Najimi A., Alizadeh M., Mohammadi A. Identifying Key Drivers Affecting the Future of Virtual Reality in Medical Education: An Anticipated Framework // *J. Educ. Health Promot.* 2025. Vol. 14. Art. 97.
https://doi.org/10.4103/jehp.jehp_1874_23

13. Abbas J.R., Gantwerker E., Volk M., Payton T., McGrath B.A., Tolley N., Isba R., Bruce I.A. Describing, Evaluating, and Exploring Barriers to Adoption of Virtual Reality: An International Modified Delphi Consensus Study // *J. Med. Extended Reality.* 2024. Vol. 1, No. 1. P. 202–214. <https://doi.org/10.1089/jmxr.2024.0022>

14. 'World's First' AI Hospital with Virtual Doctors Opens in China // *Robotics & Automation.*
URL: <https://www.roboticsandautomationmagazine.co.uk/news/healthcare/worlds-first-ai-hospital-with-virtual-doctors-opens-in-china.html>

15. China Opens 1st AI Hospital Town to Treat Patients in Virtual World // *Anadolu Agency.* URL: <https://www.aa.com.tr/en/artificial-intelligence/china-opens-1st-ai-hospital-town-to-treat-patients-in-virtual-world/3234256>

16. Mallek F., Mazhar T., Shah S.F.A., Ghadi Y.Y., Hamam H. A Review on Cultivating Effective Learning: Synthesizing Educational Theories and Virtual Reality for Enhanced Educational Experiences // *PeerJ Comput. Sci.* 2024. Vol. 10. Art. e2000.
<https://doi.org/10.7717/peerj-cs.2000>

17. Goswami S., Badwaik G., Borka A., Deshmukh P. Integration of Artificial Intelligence and Virtual Reality in Undergraduate Medical Education: A Review of Emerging Trends and Applications // *Eur. J. Cardiovasc. Med.* 2025. Vol. 15, No. 6. P. 219–221.

18. Sharaeva R.A., Kugurakova V.V., Galieva R.R., Zinchenko S.V. Approaches to the Development of Virtual Surgical Training Simulators // *Russian Digital Libraries Journal.* 2022. Vol. 25, No. 5. P. 489–532.
<https://doi.org/10.26907/1562-5419-2022-25-5-489-532>

19. *Abbas Shah S.F., Mazhar T., Shahzad T., Khan M.A., Ghadi Y.Y., Hamam H.* Integrating Educational Theories with Virtual Reality: Enhancing Engineering Education and VR Laboratories // *Soc. Sci. Humanit. Open*. 2024. Vol. 10. Art. 101207. <https://doi.org/10.1016/j.ssaho.2024.101207>

20. *Kaggwa M.M., Agboinghale P., Marginean D., Chaimowitz G.A., Olagunju A.T.* Embracing Virtual Reality in Medical Education // *Discov. Educ.* 2025. Vol. 4. Art. 129. <https://doi.org/10.1007/s44217-025-00543-1>

21. *Smith C., Rafferty K., Sharma V., Rainey E.* Effective Mitigation of Cognitive Load in Complex Mixed Reality Tasks // *Proceedings of the 20th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications (VISIGRAPP 2025)*. 2025. Vol. 1. P. 506–517. <https://doi.org/10.5220/0013373700003912>

22. *De Witte B., Reynaert V., Kieken D., Jabbour J., Demarey C., Dumoulin A., Possik J.* Immersive Virtual Reality Learning and Cognitive Load: A Multiple-Day Field Study // *Comput. Hum. Behav.* 2026. Vol. 176. Art. 108853. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2025.108853>

23. *Pearson M., Khatiwada N., Chilaka D.A.U., Omid F.* Integration of Immersive Virtual Environments (IVEs) in Healthcare Research and Design // *European Healthcare Design*. URL: <https://www.europeanhealthcaredesign.eu/news-media/integration-of-immersive-virtual-environments-ives-in-healthcare-research-and-design> (accessed: 20.02.2026)

24. *Azher S., Mills A., He J., Hyjazie T., Tokuno J., Quaiattini A., Harley J.M.* Findings Favor Haptics Feedback in Virtual Simulation Surgical Education: An Updated Systematic and Scoping Review // *Surg. Innov.* 2024. Vol. 31, No. 3. P. 331–341. <https://doi.org/10.1177/15533506241238263>

25. *Falcone V., Catic A., Heinzl F., Steinbauer P., Wagner M., Mikula F., Dorittke T., Roessler B., Farr A.* Impact of a Virtual Reality-Based Simulation Training for Shoulder Dystocia on Human and Technical Skills Among Caregivers: A Randomized-Controlled Trial // *Sci. Rep.* 2024. Vol. 14. Art. 7898. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-57785-6>

26. *Raposo R., Vairinhos M., Laska-Leśniewicz A., Sztobryn-Giercuskiewicz J.* Increasing Awareness and Empathy Among University Students Through Immersive Exercises – Testing of the Virtual Reality Application: A Pilot Study // *Med. Pr.* 2023. Vol. 74, No. 3. P. 187–197. <https://doi.org/10.13075/mp.5893.01391>

27. Mergen M., Graf N., Meyerheim M. Reviewing the Current State of Virtual Reality Integration in Medical Education – A Scoping Review // BMC Med. Educ. 2024. Vol. 24. Art. 788. <https://doi.org/10.1186/s12909-024-05777-5>

28. VR Cybersickness in Healthcare Simulation: Causes, Mitigation, and Impact // HealthySimulation.com. URL: <https://www.healthysimulation.com/vr-cybersickness-healthcare-simulation/> (accessed: 21.04.2025)

29. Ng A., Inagaki M., Antinucci R., Sockalingam S., Abdool P.S. Determining the Severity and Prevalence of Cybersickness in Virtual Reality Simulations in Psychiatry // Adv. Simul. 2025. Vol. 10. Art. 32. <https://doi.org/10.1186/s41077-025-00358-y>

30. Kim H., Kim D.J., Chung W.H., Park K.-A., Kim J.D.K., Kim D., Kim K., Jeon H.J. Clinical Predictors of Cybersickness in Virtual Reality (VR) Among Highly Stressed People // Sci. Rep. 2021. Vol. 11. Art. 12139. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-91573-w>

31. Li M. A Comprehensive Review of Virtual Reality in Medical Education // Proceedings of the 2024 International Conference on Education and Multimedia Technology (ICEMT). Atlantis Press, 2024. P. 71–76.

32. Liu S., Yang J., Zhang C., Zhang J., Wang Q., Zhou R., Zhao Z., Ren S., Yi H., Guo H., Xia J. Use of a Nonimmersive Virtual Reality System for Clinical Thinking in Obstetric Nursing Education: Mixed Methods Study // J. Med. Internet Res. 2025. Vol.27. Art. e80951. <https://doi.org/10.2196/80951>

33. Kane D., Ryan G., Mangina E., McAuliffe F.M. A Randomized Control Trial of a Virtual Reality Learning Environment in Obstetric Medical Student Teaching // Int. J. Med. Inform. 2022. Vol. 168. Art. 104899. <https://doi.org/10.1016/j.ijmedinf.2022.104899>

34. V Sechenovskom universitete zapustili novyj obrazovatel'nyj kurs po razrabotke reshenij virtual'noj i dopolnennoj real'nosti v medicine // Official website of Sechenov University. URL: <https://www.sechenov.ru/pressroom/news/v-sechenovskom-universitete-zapustili-novyy-obrazovatelnyy-kurs-po-razrabotke-resheniy-virtualnoy-i-/> (accessed: 04.08.2025)

35. Esmaeeli E., Soleimani A., Khorashadizadeh M.S., Shahmoradi L., Nekoonam S., Rezayi S. A Practical Framework for Developing a Virtual Reality-Based Anatomy Education Application: Key Content and Technical Requirements // Sci. Rep. 2025. Vol. 15. Art. 12536. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-96074-8>

36. Lopanchuk P.A., Gushchin A.V., Anurov M.V., Korneeva E.V. Integraciya simuljacionnogo obucheniya v medicinskoe obrazovanie: opyt RNIMU im. N.I. Pirogova // Metodologiya i tekhnologiya nepreryvnogo professional'nogo obrazovaniya. 2023. Vol. 4, No. 16. P. 15–45.

37. VR Training in 2025: Benefits, Best Practices & Industry Use Cases // YORD Studio Blog. URL: <https://yordstudio.com/vr-training-in-2025-benefits-best-practices-and-industry-use-cases/> (accessed: 16.09.2025)

38. Xpeer. Future of Medical Education: AI, VR & Microlearning // LinkedIn. URL: https://www.linkedin.com/posts/xpeercmc_future-of-medical-education-ai-vr-microlearning-activity-7394682957111857152-SGpG (accessed: 21.06.2026)

39. Siddiqui M.F., Jabeen S., Alwazzan A., Vacca S., Dalal L., Al-Haddad B., Jaber A., Ballout F.F., Abou Zeid H.K., Haydamous J., El Hajj Chehade R., Kalamatov R. Integration of Augmented Reality, Virtual Reality, and Extended Reality in Healthcare and Medical Education: A Glimpse into the Emerging Horizon in LMICs—A Systematic Review // J. Med. Educ. Curric. Dev. 2025. Vol. 12. Art. 23821205251342315. <https://doi.org/10.1177/23821205251342315>

40. Li Q., Duan H., Zhou X., Sun X., Tao L., Lu X. The Use of Metaverse in Medical Education: A Systematic Review // Clin. Med. 2025. Vol. 25. Art. 100315. <https://doi.org/10.1016/j.clinme.2025.100315>

41. Setiawan I., Suhoyo Y., Widyandana D., Emilia O. Comparison of Virtual Reality and Mannequin-based Postpartum Hemorrhage Training: A Randomized Controlled Trial // Open Nurs. J. 2025. Vol. 19. Art. e18744346426336. <https://doi.org/10.2174/0118744346426336251001074230>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

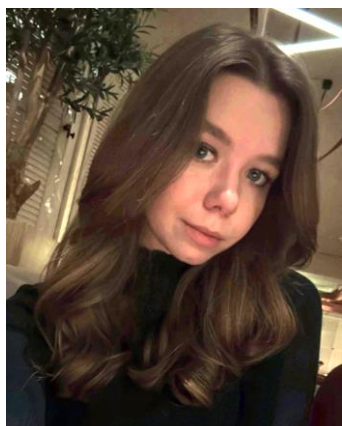


РАХМАТУЛЛИНА Миляуша Дамировна – И.о. проректора, Директор департамента цифровой трансформации университета ФБГОУ ВО Казанский ГМУ Минздрава России.

Milyausha Damirovna RAKHMATULLINA – Acting Vice-Rector, Director of the Department of Digital Transformation of the University of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Kazan State Medical University of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation.

email: milyaushadamirovna@mail.ru

ORCID: 0009-0000-4476-8570



КАРПЕЕВА Юлия Алексеевна – лаборант-исследователь Института информационных технологий и интеллектуальных систем Казанского федерального университета. Направление исследований: проектный менеджмент в игровой разработке.

Yuliya Alexeevna KARPEEVA – laboratory assistant at the Institute of Information Technologies and Intelligent Systems, Kazan Federal University. Research area: project management in game development.

email: leyaleit@gmail.com

ORCID: 0009-0005-1632-2914

Материал поступил в редакцию 26 апреля 2026 года

РАЗРАБОТКА МОДУЛЬНОЙ АРХИТЕКТУРЫ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ ИНТЕРФЕЙСОВ ДЛЯ ИГР НА ДВИЖКЕ UNREAL ENGINE С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛАГИНА-ФРЕЙМВОРКА COMMON UI

М. В. Шматко¹ [0000-0002-7255-8885], А. Д. Мякишев² [0009-0001-3985-7672]

^{1, 2}Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

¹marin298@gmail.com, ²makisevaleksey537@gmail.com

Аннотация

Статья посвящена разработке и экспериментальной верификации модульной архитектуры пользовательского интерфейса для игровых проектов на движке Unreal Engine. В ходе исследования выявлены типовые антипаттерны проектирования UI (монолитные виджет-структуры, жесткие ссылки, пренебрежение абстракцией, платформенная зависимость) и проведен анализ существующих архитектурных подходов (Data-Driven UI, MVC, MVVM), показавший их ограничения. Предложена архитектура, интегрирующая фреймворк Common UI, механизм асинхронной загрузки с мягкими ссылками (Soft References), систему тегов Gameplay Tags и реестр данных для динамической генерации меню настроек. Архитектура реализована в виде плагина AdvancedGameUserInterface. Его экспериментальная апробация с участием 12 разработчиков и 5 дизайнеров интерфейсов подтвердила эффективность предложенного решения по трем ключевым метрикам: сопровождаемость, производительность и масштабируемость. Сформулированы практические рекомендации по применению разработанной архитектуры в зависимости от масштаба игрового проекта. Полученные результаты могут быть использованы разработчиками для повышения качества и снижения затрат на сопровождение пользовательских интерфейсов в игровых проектах на Unreal Engine.

Ключевые слова: *Unreal Engine, пользовательский интерфейс, Common UI, модульная архитектура, Gameplay Tags, Data-Driven UI, антипаттерны, сопровождаемость, масштабируемость, производительность, игровая разработка.*

ВВЕДЕНИЕ

В современной игровой индустрии стремительно растет сложность реализуемых проектов, что повышает требования к качеству программной архитектуры видеоигр. Пользовательский интерфейс (UI), являясь связующим звеном между игроком и игровой механикой, часто становится источником архитектурных проблем [1]. Анализ практик разработки игровых проектов в среде Unreal Engine показывает, что стихийное проектирование UI приводит к возникновению монолитных структур – так называемых «мастер-виджетов». Такие структуры обладают высокой связанностью (high coupling), что критически затрудняет внесение изменений: модификация одного элемента, например смена шрифта, требует ручного редактирования сотен виджетов, а адаптация интерфейса под различные типы ввода (клавиатура и мышь или геймпад) зачастую – создания отдельных сборок проекта [1, 2].

Несмотря на наличие в экосистеме Unreal Engine инструментов, призванных решить эти проблемы, в частности плагина-фреймворка Common UI, предоставляющего поддержку кроссплатформенности и навигации «из коробки», вопросы построения на их основе целостной, масштабируемой архитектуры остаются малоизученными. Существующая документация описывает отдельные компоненты, но не предлагает системного подхода к их интеграции [3].

Таким образом, актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью разработки архитектурного решения для создания UI игровых проектов в Unreal Engine, которое минимизировало бы связанность компонентов, автоматизировало бы управление стилями и обеспечивало бы эффективное использование ресурсов.

В связи с этими целями исследования являются разработка и экспериментальная верификация модульной архитектуры пользовательских интерфейсов для игровых проектов на движке Unreal Engine, обеспечивающей повышение сопровождаемости кода, производительности и масштабируемости. Для их достижения поставлены следующие задачи.

1. Обзорно-аналитическая задача: выявить типовые архитектурные антипаттерны при разработке UI в Unreal Engine, а также проанализировать возможности для интеграции и ограничения существующих архитектурных подходов (Data-Driven UI, MVC, MVVM).

2. Конструкторская задача: создать модульную архитектуру UI для игровых проектов на движке Unreal Engine с использованием Common UI.

3. Экспериментальная задача: реализовать прототип игрового проекта на основе предложенной архитектуры, провести его апробацию и выполнить сравнительный анализ с монолитным подходом по метрикам: время внесения изменений (сопровождаемость), потребление оперативной памяти (производительность), трудоемкость добавления нового функционала (масштабируемость).

Научная новизна настоящего исследования состоит в следующем:

1. Предложена модульная архитектура пользовательского интерфейса игровых проектов, интегрирующая Common UI, Gameplay Tags и механизм асинхронной загрузки (Blueprint Async Action, Soft References). Архитектура реализует слабосвязанную многослойную организацию UI, обеспечивающую динамическое управление виджетами без жестких ссылок на экземпляры, что уменьшает расход памяти, отводимый на UI.

2. Экспериментально верифицирован подход к централизованному управлению стилями на основе иерархии классов стилей, доказывающий свою эффективность в сокращении временных затрат на глобальные изменения визуального оформления.

3. Предложена схема использования реестра данных в качестве бэкенда для динамической генерации меню настроек, позволяющая отделить логику представления от данных конфигурации и упрощающая масштабирование системы (добавление новых параметров без изменения кода).

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ И ОГРАНИЧЕНИЙ РАЗРАБОТКИ UI В UNREAL ENGINE

Пользовательский интерфейс в Unreal Engine имеет иерархическую структуру и включает несколько уровней абстракции. Его базовым слоем является Slate – низкоуровневый фреймворк для разработки интерфейсов на C++, который используется, как правило, для создания редакторских инструментов и спе-

специализированных систем, требующих прямого контроля над логикой рендеринга. Из-за высокого порога вхождения Slate редко напрямую применяют в игровом коде [4].

Поверх Slate надстроена система Unreal Motion Graphics (UMG) – основной инструмент разработки пользовательского интерфейса в игровых проектах. UMG представляет собой визуальную оболочку над Slate и предоставляет удобный редактор, позволяющий создавать виджеты непосредственно в среде игрового движка. Виджеты (Widgets) – это все элементы, из которых визуальнo строится интерфейс. Таким образом, кнопки, текстовые поля, изображения, контейнеры, а также такие более сложные структуры, как меню, окна и HUD, являются виджетами [4].

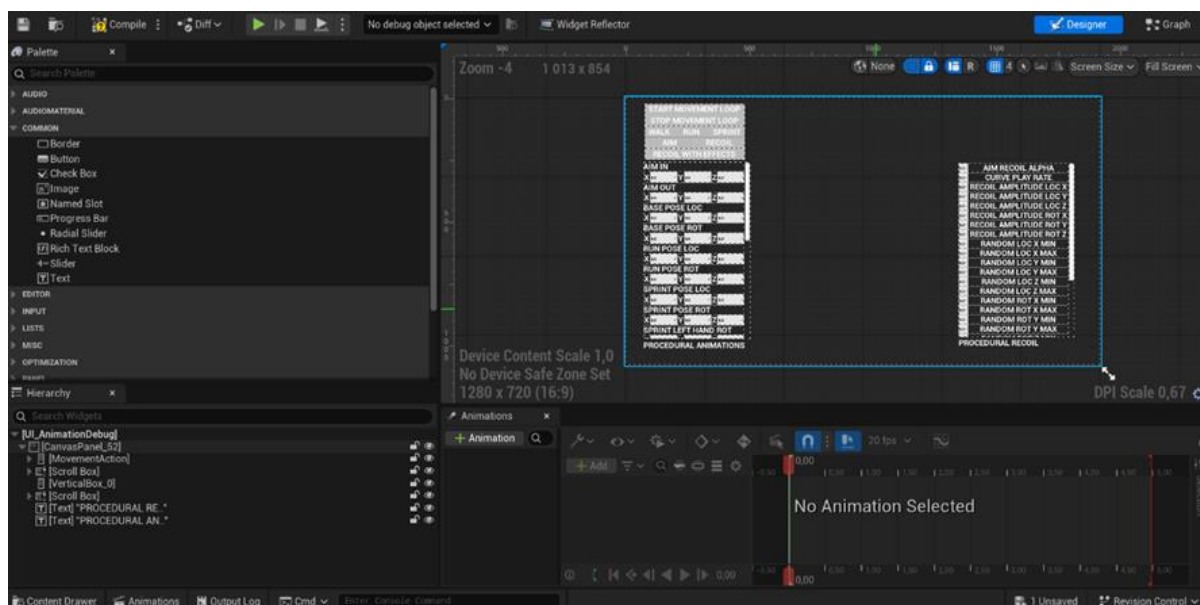


Рис. 1. Пример рабочей области в среде Unreal Engine с созданным интерфейсным окном.

Логика поведения компонентов пользовательского интерфейса обычно реализуется через систему Blueprints, что позволяет дизайнерам и разработчикам создавать интерактивные окна без необходимости писать большое количество C++ кода. Кроме того, UMG поддерживает анимацию интерфейса, что позволяет создавать плавные переходы между экранами и различные визуальные эффекты (см. рис. 1).

Следующим уровнем иерархической структуры пользовательского интерфейса в Unreal Engine является Common UI – специализированный плагин-фреймворк, расширяющий возможности UMG и предназначенный для разработки масштабируемых и кроссплатформенных интерфейсов [5].

Common UI не заменяет UMG, а работает поверх него, предоставляя передовые решения в сфере разработки интерфейса на Unreal Engine: например, с его помощью был организован интерфейс масштабного демонстрационного игрового проекта Lyra от Epic Games. Кодовая база Common UI активно развивается и поддерживается. Одной из ключевых возможностей плагина-фреймворка является система управления фокусом и навигацией между элементами пользовательского интерфейса. Это значительно упрощает его разработку для мультиплатформенных игровых проектов (решения с автоматической поддержкой различных устройств ввода, включая клавиатуру, мышь и геймпад). Кроме того, Common UI вводит концепцию активируемых виджетов (Activatable Widgets), позволяющую строить пользовательский интерфейс в виде иерархии экранов и слоев меню. Это облегчает реализацию типичных сценариев интерфейса, таких как переходы между меню, обработка кнопки «Назад», активация и отключение Pop-Up окон и др. Для централизованного управления визуальным стилем интерфейса Common UI использует отдельные классы, содержащие стилеобразующие данные, что позволяет задавать стили кнопок и других элементов в одном месте, а затем применять их ко всему интерфейсу игрового проекта.

Проанализируем типовые проблемы и архитектурные антипаттерны, которые возникают при разработке пользовательского интерфейса в Unreal Engine.

В каждом игровом проекте существует ряд распространенных проблем, связанных с организацией и управлением пользовательским интерфейсом. Например это управление активными и неактивными состояниями разных элементов интерфейса: в ситуации, когда игроку одновременно на экране показывается несколько меню, разработчику необходимо обеспечить взаимодействие игрока только с одним из них.

Другой частой проблемой становятся обработка всплывающих окон и обеспечение перехода между разными экранами интерфейса. Например, если

на экране появляется модальное окно, которое закрывается по нажатию на любую кнопку, как гарантировать, что после его закрытия пользователь переместится именно туда, куда нужно? Как эффективно отслеживать все открытые интерфейсные элементы и управлять порядком их отображения?

Кроме того, в любом игровом проекте разработчики пользовательского интерфейса отвечают за механизмы сбора и отслеживания нужных для отображения данных, собираемых из других игровых систем. Впоследствии эти данные могут также сохраняться в системах учетных записей и облачных хранилищах [6]. Возникает закономерный вопрос: какие системы сбора данных существуют и какие из них наиболее эффективно справляются со всем спектром подобных задач.

Описанные примеры иллюстрируют лишь часть проблем, с которыми сталкиваются разработчики при создании пользовательских интерфейсов игровых проектов. Для их устранения они нередко прибегают к локальным решениям, которые хорошо работают на ранних этапах, но плохо масштабируются [7]. Как правило, подобные решения связаны с применением антипаттернов.

Антипаттерны – это нетипичные способы решения задач, допустимые на этапах MVP и прототипирования ради скорости, но в долгосрочной перспективе затрудняющие расширение задач и сопровождение игрового проекта [8].

Антипаттерны разработки пользовательских интерфейсов в среде Unreal Engine можно разделить на несколько категорий: они имеют свои причины внедрения и недостатки [9]. В табл. 1 дано их описание и показаны характеристики.

Табл. 1. Антипаттерны разработки пользовательских интерфейсов в среде Unreal Engine.

Антипаттерн	Описание	Причины внедрения	Недостатки внедрения
Monolithic (God) Widget (монолитные виджеты-структуры)	Крупные, сложно поддерживаемые виджеты без деления на компоненты. Весь интерфейс или его значительная часть собраны в одном виджете.	Нехватка архитектурного планирования, быстрая разработка, отсутствие декомпозиции.	Трудность масштабирования и повторного использования, сложность сопровождения.

Hard References (жесткие ссылки)	Прямые ссылки на классы виджетов, что принуждает движок держать их в памяти постоянно, а также ссылки внутри виджета на внешние объекты для получения данных.	Нехватка планирования, быстрая разработка, отсутствие понимания механизмов загрузки.	Увеличение потребления оперативной памяти, высокая связанность компонентов.
Lack of Abstraction (пренебрежение абстракцией)	Отсутствие разделения ответственности между UI и геймплейной логикой: например, UI постоянно опрашивает данные на каждом кадре через Tick или Property Bindings.	Стремление к быстрой реализации, неиспользование архитектурных паттернов (MVC/MVVM).	Сложность сопровождения, высокая связанность, сложный рефакторинг, потеря производительности.
Platform Dependency (платформенная зависимость)	Отсутствие поддержки различных платформ и систем ввода. Интерфейс завязан на конкретный тип устройств: например, только клавиатура и мышь.	Отсутствие архитектуры, учитывающей кроссплатформенность, недостаток планирования.	Невозможность запуска игры на нескольких платформах без переработки UI, потеря части аудитории.

Представленные антипаттерны разработки интерфейсов в среде Unreal Engine влекут за собой не только технические проблемы сопровождения, но и прямые нарушения качества интерфейса с точки зрения пользователя.

Исследования в области создания пользовательских интерфейсов выделяют ряд фундаментальных критериев для оценки их качества: согласованность (consistency), обратная связь (feedback), предсказуемость (predictability) и др. [10]. В табл. 2 показано соответствие между выявленными антипаттернами и нарушаемыми ими критериями.

Табл. 2. Влияние архитектурных антипаттернов на качество UI.

Нарушаемый критерий UI	Антипаттерн	Проявление для пользователей
Согласованность (Consistency)	Monolithic (God) Widget	Глобальное изменение стиля (шрифт, цвет) применяется непоследовательно: одни элементы интерфейса обновляются, другие – сохраняют старый стиль.
Обратная связь (Feedback)	Hard References	Длительная загрузка интерфейса при старте игры, заметные фризы при открытии меню из-за конкуренции за ресурсы.
Обратная связь (Feedback)	Lack of Abstraction (Tick/Property Bindings)	Неотзывчивость интерфейса при взаимодействии, задержки между действием игрока и откликом системы, снижение частоты кадров.
Предсказуемость (Predictability)	Platform Dependency	Навигация по меню с геймпада работает иначе, чем с клавиатуры, что дезориентирует пользователей и требует повторного освоения управления.

Таким образом, основа для разработки устойчивого и расширяемого пользовательского интерфейса в игровых проектах – это грамотно спроектированная архитектура UI.

АРХИТЕКТУРНЫЕ ПОДХОДЫ К РАЗРАБОТКЕ UI В UNREAL ENGINE

Для преодоления описанных выше проблем и антипаттернов в практике разработки пользовательских интерфейсов на Unreal Engine применяют несколько архитектурных подходов, ориентированных на разделение данных и представления. Наиболее распространенными из них являются Data-Driven-подход, а также паттерны MVC и MVVM.

Data-Driven-подход позволяет отделить данные и логику от визуального представления. Он хорошо сочетается с принципами SOLID, что способствует снижению связанности компонентов и повышению расширяемости системы. Схематично Data-Driven-подход представлен на рис. 2.

Data-Driven UI

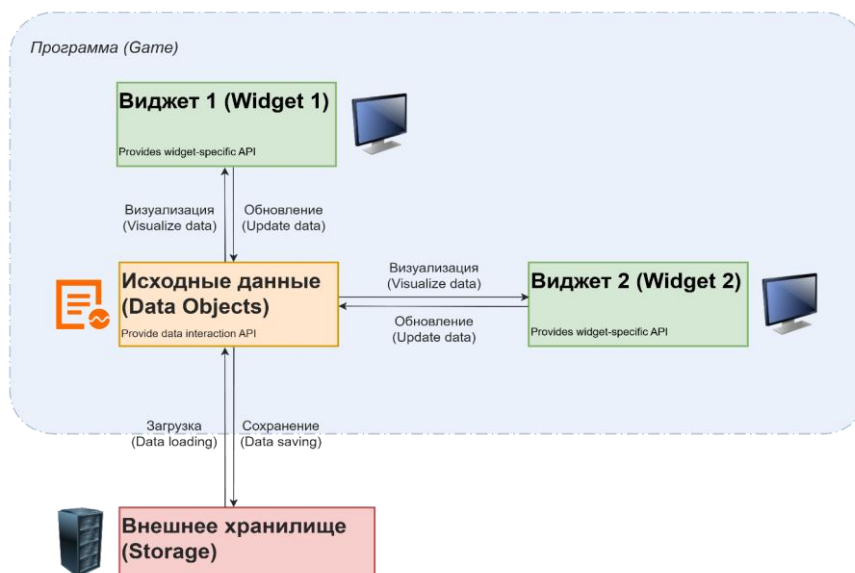


Рис. 2. Общая схема Data-Driven-подхода.

Идея подхода заключается в создании классов для инкапсуляции всех данных (информации о том, что UI должен показывать игроку) и предоставлении набора методов, раскрывающих важные аспекты системы и ее состояние [6]. В проекте на Unreal Engine это помогает избежать использования событий Tick в Blueprint и Property Bindings, которые приводят к частым запросам данных и создают дополнительную нагрузку на систему. Отделение жизненного цикла данных от жизненного цикла UI особенно важно, поскольку предметы инвентаря, предложения внутриигрового магазина или статистика игрока в определенный момент времени могут не совпадать с объектами пользовательского интерфейса. В случае с Data-Driven-подходом программист может использовать несколько виджетов, получающих данные от одних и тех же объектов, что упрощает разработку.

Data-Driven-подход к проектированию архитектуры интерфейса в проекте на Unreal Engine чаще всего реализуют с использованием паттернов MVC и MVVM.

Паттерн MVC (Model-View-Controller) разделяет систему на три компонента:

- 1) модель (Model) – хранит данные и бизнес-логику;
- 2) представление (View) – отвечает за отображение данных (виджеты);

3) контроллер (Controller) – управляет взаимодействием между моделью и представлением.

На рис. 3 показана схема паттерна MVC.

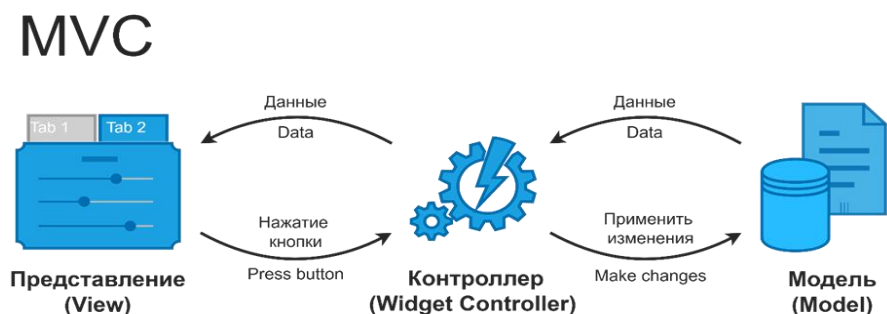


Рис. 3. Схема паттерна MVC.

Такое разделение делает код модульным: замена виджетов не влияет на контроллер, а замена контроллера – на хранилище данных [11].

Паттерн MVVM (Model-View-ViewModel) расширяет MVC, добавляя ViewModel – посредника с двунаправленной привязкой данных для автоматического обновления UI [12]. В Unreal Engine MVVM реализован через официальный плагин UMG Viewmodel, входящий в состав движка (см. рис. 4).

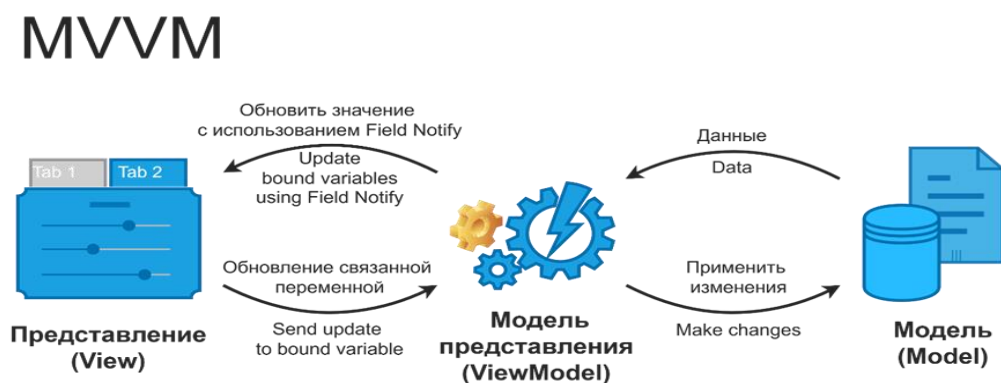


Рис. 4. Схема паттерна MVVM.

Рассмотренные подходы Data-Driven UI, MVC и MVVM предоставляют разработчикам инструменты для снижения связанности компонентов, отделения логики от представления и повышения масштабируемости интерфейсных решений. Однако их применение в чистом виде не решает всех проблем, характерных для разработки пользовательского интерфейса в Unreal Engine. В частности, они не предлагают встроенных механизмов для:

- управления многослойной организацией интерфейса (стеки виджетов);
- асинхронной загрузки экранов с использованием мягких ссылок;
- гибкой адресации элементов интерфейса через теги;
- централизованного конфигурирования меню настроек на основе реестра данных.

Указанные ограничения определяют необходимость разработки специализированного архитектурного решения, интегрирующего существующие паттерны с дополнительными механизмами, адаптированными к специфике Unreal Engine.

АРХИТЕКТУРА МОДУЛЬНОЙ СИСТЕМЫ UI НА ОСНОВЕ COMMON UI И C++

Анализ типичных антипаттернов, проведенный в рамках настоящего исследования, позволил оптимизировать подход и на основе Common UI создать архитектуру модульной системы пользовательского интерфейса. Эта архитектура реализована в виде отдельного плагина AdvancedGameUserInterface, что обеспечивает возможность повторного использования и расширения системы UI в различных игровых проектах. На рис. 5 представлена карта связей внутриигровых меню в разработанной системе.



Рис. 5. Карта связей внутриигровых меню в разработанной системе UI.

Предлагаемая система UI включает следующие компоненты:

- система шаблонных базовых классов для унификации визуальных элементов;
- многослойная организация интерфейса на основе стеков (Widget Stacks);
- механизм адресации и управления интерфейсом с использованием Gameplay Tags;
- динамическая система конфигурирования меню настроек на основе Data Registry;
- подсистема управления загрузочными экранами.

Логика работы системы UI строится на использовании ряда базовых механизмов Unreal Engine, обеспечивающих модульность и масштабируемость архитектуры.

1. Subsystems – классы, автоматически создаваемые в Runtime в рамках определенного контекста (GameInstance, World, LocalPlayer). В разработанной

системе используется ULocalPlayerSubsystem, что обеспечивает привязку UI к конкретному игроку.

2. Developer Settings – классы, наследуемые от UDeveloperSettings, которые отображаются в Project Settings и сохраняются в ini-файлы проекта: задействованы, чтобы хранить ссылки на классы виджетов и другие параметры системы UI. Это позволило избежать констант в коде.

3. Blueprint Async Action – асинхронные функции Blueprint: в разработанной системе применены для загрузки и отображения интерфейсных экранов без блокировки игрового потока.

4. Gameplay Tags – иерархические строковые метки (ярлыки) для описания состояний и данных: использованы для адресации и идентификации элементов пользовательского интерфейса.

5. Input Processor – механизм низкоуровневого перехвата пользовательского ввода на уровне Slate, позволивший реализовать корректную систему переназначения клавиш.

6. Data Assets – объекты хранения данных: применены в разработанной системе для конфигурирования интерфейсных элементов.

7. CommonUI, UMG widgets – базовые классы виджетов, от которых наследуются пользовательские элементы интерфейса.

8. Blueprint Function Library – классы для хранения публичных статических функций: задействованы для обеспечения удобного доступа к данным конфигурации.

Представим основные элементы архитектуры модульной системы пользовательского интерфейса, созданной на основе Common UI.

1. Шаблонизация и централизованное управление стилями в Common UI.

Этот механизм реализован в базовом шаблоне интерфейсного окна WBP_Template_Layout. Шаблон использует именные слоты – Named Slots, которые позволяют динамически вставлять различные элементы интерфейса в заранее определенные области (см. рис. 6).

Такой подход позволяет разделить структуру интерфейса и его содержимое: разработчик создает новые окна, используя единый шаблон, что обеспечивает единообразие расположения элементов управления, областей описания и панелей меню.

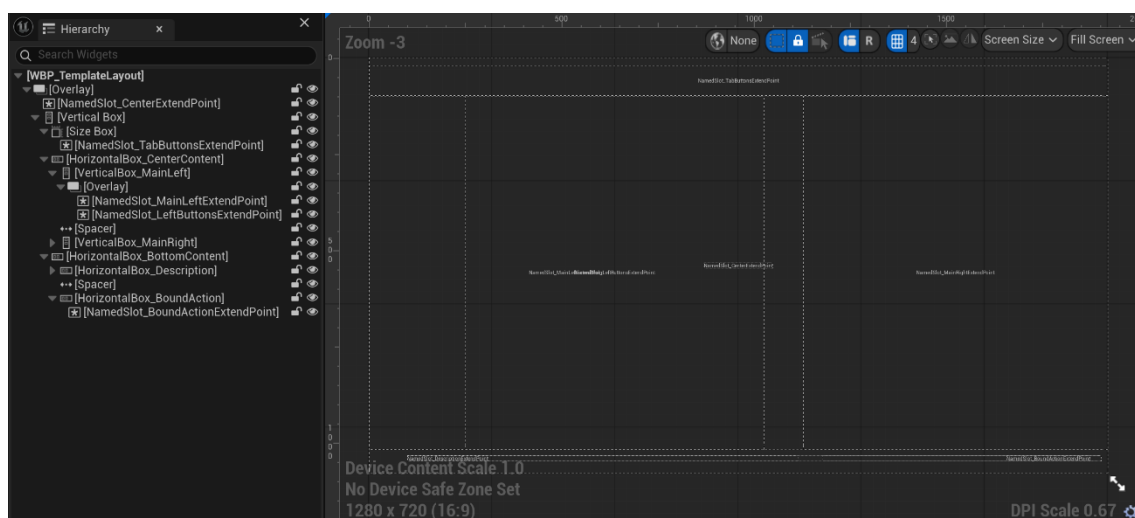


Рис. 6. Базовый шаблон интерфейсного окна WBP_Template_Layout.

Наряду с этим реализовано централизованное хранение стилевых данных для визуальных компонентов интерфейса, таких как кнопки, текстовые блоки и пр. В системе UI выделены отдельные классы стилей, содержащие параметры визуального оформления – цвета, шрифты, размеры и пр. (см. рис. 7). Такое решение позволяет вносить глобальные изменения в оформление интерфейса, не модифицируя каждый виджет по отдельности.

Widget Styles

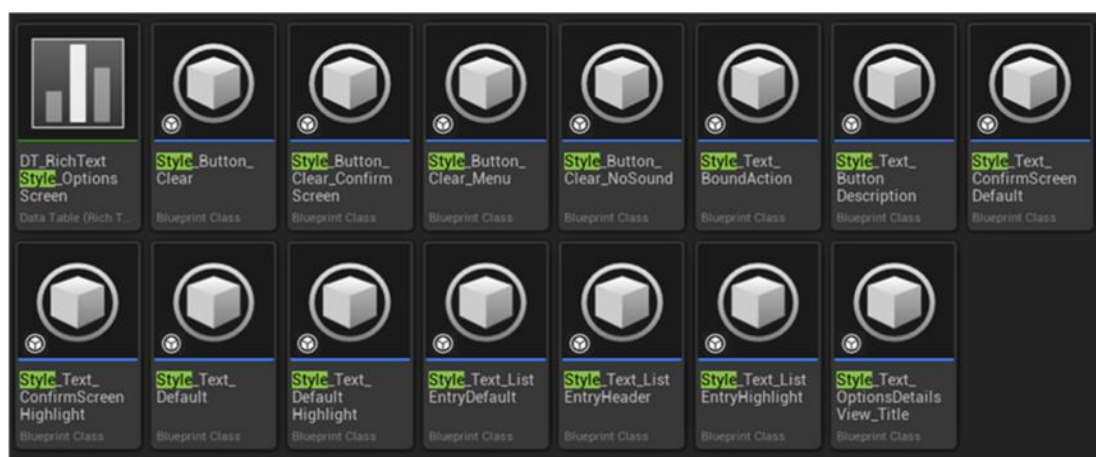


Рис. 7. Классы стилей модульной системы UI.

2. Многослойная организация пользовательского интерфейса на основе стеков виджетов (Widget Stacks).

Преимуществом созданной архитектуры является многослойная система UI, центральным элементом которой является корневой виджет Primary Layout: он добавляется в Viewport при инициализации пользовательского интерфейса. Primary Layout содержит набор контейнеров-стеков, каждый из которых отвечает за отображение определенного слоя интерфейса. В разработанной системе использованы четыре основных слоя:

- GameHUD – слой для окон, отображаемых во время игрового процесса. В этот слой входят элементы HUD, такие как индикаторы состояния игрока, мини-карта, подсказки и другие элементы игрового интерфейса;
- GameMenu – слой для отображения внутриигровых меню, доступных во время игры, например меню инвентаря;
- Frontend – слой главного меню игры, отображающий экраны запуска игры, главное меню, экран настроек и другие элементы интерфейса, которые не имеют непосредственного отношения к игровому процессу;
- Modal – слой модальных окон, который располагается поверх остальных слоев и используется для отображения всплывающих диалогов подтверждения.

Каждый слой в системе UI реализован как контейнер CommonActivatableWidgetContainerBase, который управляет отображением виджетов по принципу стека. При открытии нового интерфейсного окна оно помещается в соответствующий стек, а при закрытии – удаляется из него (см. рис. 8).

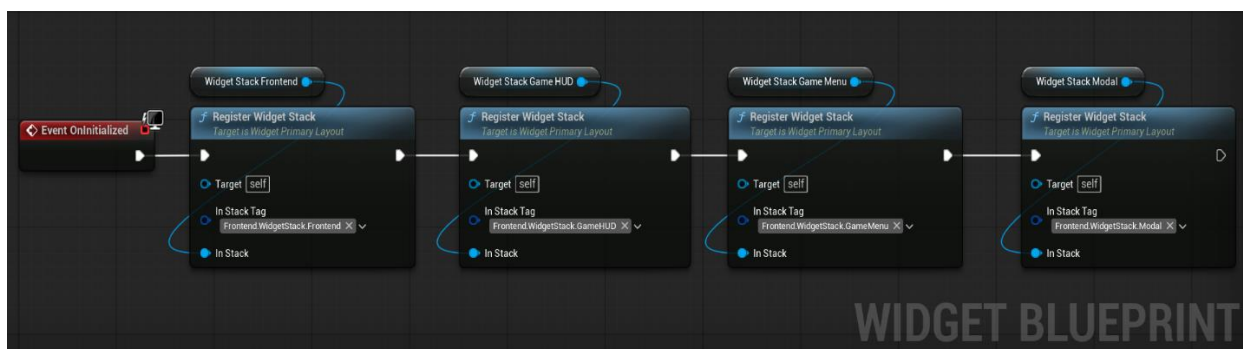


Рис. 8. Регистрация стеков при инициализации в корневом виджете Primary Layout.

Многослойную архитектуру UI реализует класс FrontendUISubsystem (листинг header-файла приведен на рис. 9). Этот ключевой класс, наследуемый от ULocalPlayerSubsystem, обеспечивает привязку системы интерфейса к конкретному игроку и отвечает за асинхронную инициализацию корневого виджета Primary Layout, его хранение, а также за добавление виджетов в соответствующие стеки по тегам с использованием мягких ссылок и асинхронной загрузки.

3. Адресация и управление с помощью Gameplay Tags.

В созданной архитектуре Gameplay Tags обеспечивают идентификацию слоев интерфейса, получение классов интерфейсных экранов, управление изображениями и др. ресурсами.

Использование Gameplay Tags позволяет отказаться от жестких ссылок на конкретные классы виджетов: система оперирует мягкими ссылками (Soft References), которые загружаются в память только в нужный момент. Такой подход обеспечивает два преимущества:

- снижение потребления оперативной памяти, поскольку неиспользуемые интерфейсные элементы не загружаются заранее;
- повышение гибкости архитектуры, так как разработчик может изменять используемые виджеты через настройки игрового проекта без изменения исходного кода.

```
C++
UCLASS()
class ADVANCEDGAMEUSERINTERFACE_API UFrontendUISubsystem : public ULocalPlayerSubsystem
{
    GENERATED_BODY()

public:
    //static UFrontendUISubsystem* Get(const UObject* WorldContextObject);
    static UFrontendUISubsystem* GetFromPlayerController(const APlayerController*
PlayerController);
    static UFrontendUISubsystem* GetFromLocalPlayer(const ULocalPlayer* LocalPlayer);

    //~Begin USubsystem Interface
    //virtual bool ShouldCreateSubsystem(UObject* Outer) const override;
    //~End USubsystem Interface

    UFUNCTION(BlueprintCallable)
    bool IsPrimaryLayoutWidgetRegistered() const;

    void RegisterAndAddPrimaryLayoutAsync(TWeakObjectPtr<APlayerController> PlayerController,
TSoftClassPtr<UWidget_PrimaryLayout> InSoftPrimaryLayoutWidgetClass,
TFunction<void(EAsyncPushWidgetState, UWidget_PrimaryLayout*)>
AsyncCreationStateCallback);

    void PushSoftWidgetToStackAsync(const FGameplayTag& InWidgetStackTag,
TSoftClassPtr<UWidget_ActivatableBase> InSoftWidgetClass,
TFunction<void(EAsyncPushWidgetState, UWidget_ActivatableBase* )>
AsyncPushStateCallback);

    void PushConfirmScreenToModalStackAsync(EConfirmScreenType InScreenType,
const FText& InScreenTitle,
const FText& InScreenMsg,
TFunction<void(EConfirmScreenButtonType)> ButtonClickedCallback);

    UPROPERTY(BlueprintAssignable)
    FOnButtonDescriptionTextUpdatedDelegate OnButtonDescriptionTextUpdated;

private:
    UPROPERTY(BlueprintReadOnly, Transient, meta = (AllowPrivateAccess = true))
    TObjectPtr<UWidget_PrimaryLayout> CreatedPrimaryLayout;
};
```

Рис. 9. Листинг header-файла FrontendUISubsystem.

Асинхронная загрузка интерфейсных экранов реализуется с помощью специальных Blueprint-узлов, созданных с использованием класса UBlueprintAsyncActionBase (см. рис. 10). Узлы создают виджет, загружают его в память и помещают в соответствующий стек.

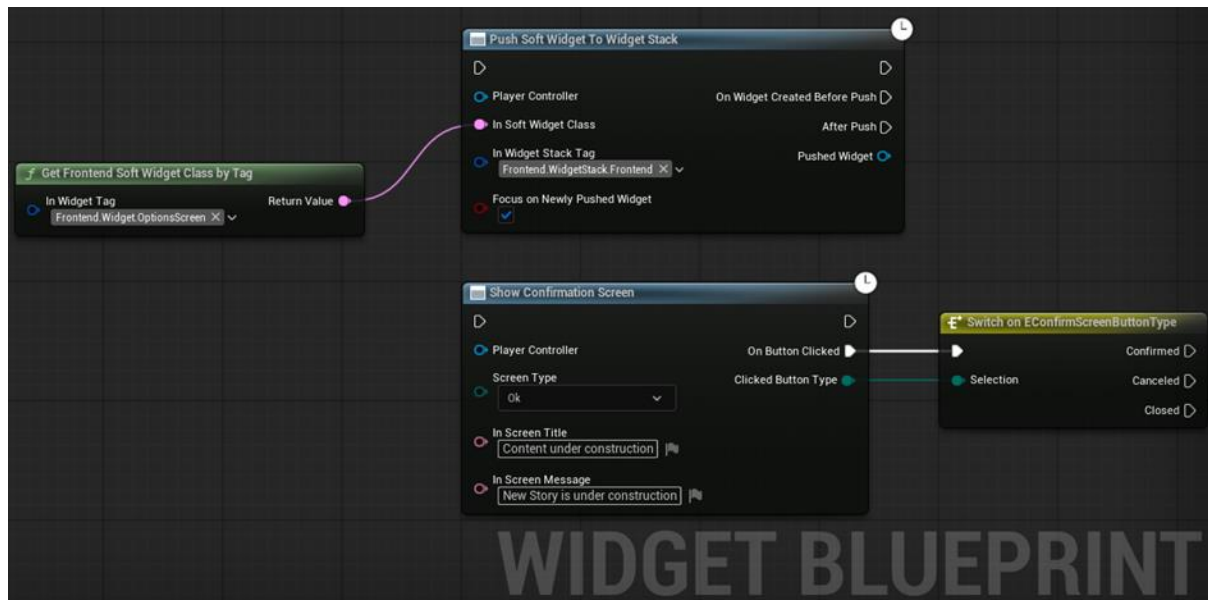


Рис. 10. Асинхронная загрузка UI-экранов с помощью Blueprint-узлов.

Виджеты задаются в Custom Developer Settings. На рис. 11 продемонстрирована разработанная секция Developer Settings, где каждому тегу соответствует свой виджет.

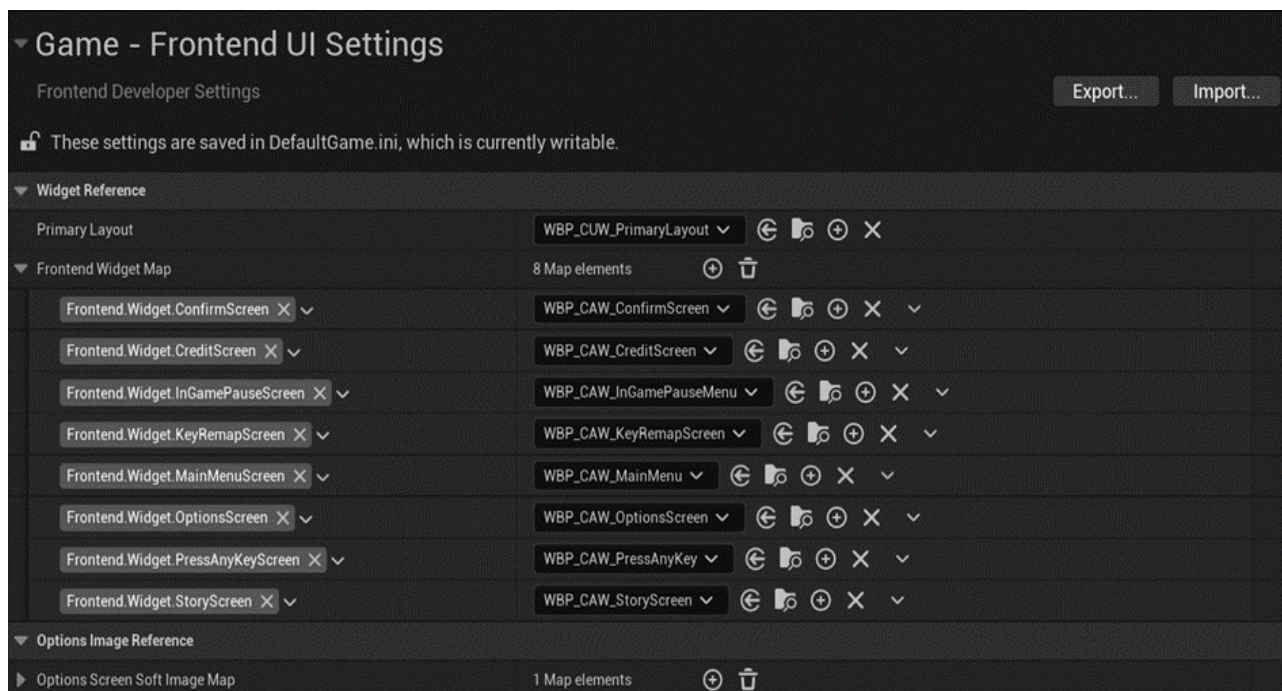


Рис. 11. Секция Custom Developer Settings с соответствием Gameplay Tags и виджетов интерфейса.

4. Динамическая система настроек на основе Data-Driven подхода.

В традиционных подходах структура меню настроек жестко задана в виджетах, что усложняет изменение и добавление новых параметров. В созданной архитектуре эта проблема решена за счет динамического подхода, основанного на данных (Data-Driven): структура меню формируется процедурно на основе объектов данных.

Основу такой системы составляет иерархия классов данных, показанная на рис. 12.

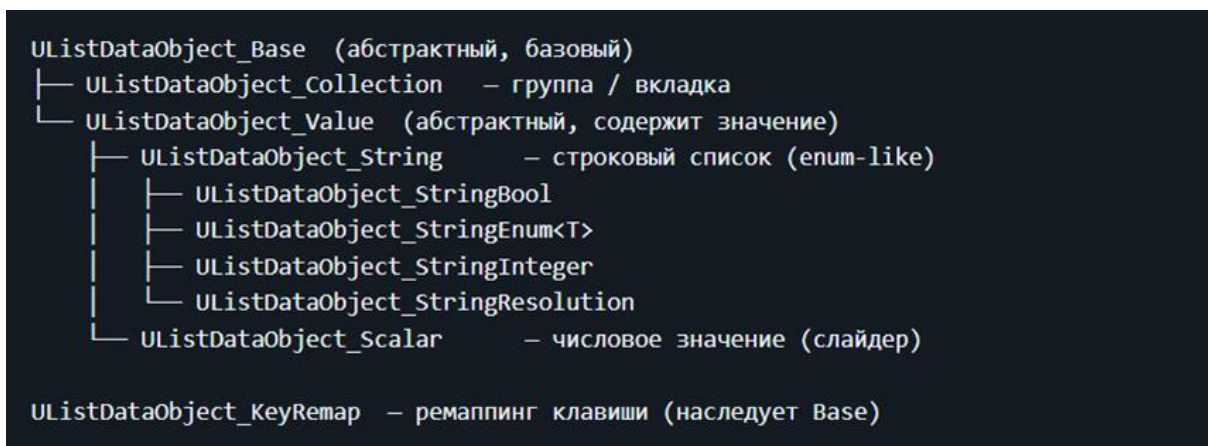


Рис. 12. Структура классов данных, обеспечивающих процедурное формирование меню настроек.

Каждый объект данных содержит информацию о параметре настройки: текущее значение, доступные варианты выбора, условия редактирования, а также зависимости от других параметров. Кроме того, система поддерживает возможность сброса параметров к значениям по умолчанию.

Все данные настроек регистрируются в специальном реестре OptionsDataRegistry, который формирует структуру вкладок меню настроек. При открытии экрана настроек система автоматически запрашивает данные из реестра и динамически формирует список элементов интерфейса. Благодаря этому добавление новых настроек выполняется без изменения структуры Blueprints.

Использование реестра данных позволяет отделить логику меню настроек от визуального представления, что соответствует Data-Driven-подходу и значительно упрощает масштабирование системы.

Рассмотрим, как разработанная модульная система UI интегрируется в игровой проект.

Для тестирования логики и примера интеграции был создан тестовый игровой проект, включающий уровни MainMenuLevel, Level_1, а также контроллеры BP_MainMenuPlayerController и BP_FirstPersonPlayerController. Добавление Blueprint-кода в эти контроллеры обеспечивает их взаимодействие с созданной системой UI (см. рис. 13 и 14).

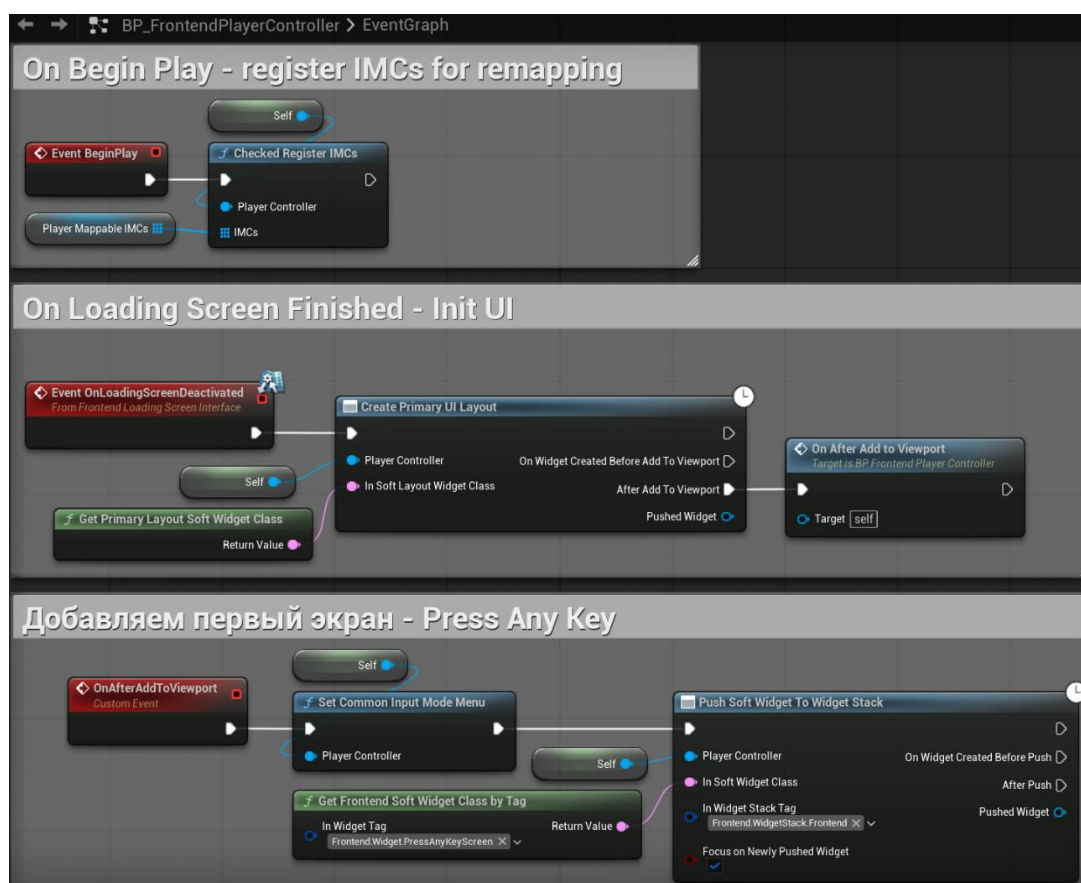


Рис. 13. Настройка контроллера главного меню.

Предложенная модульная система пользовательского интерфейса, реализованная в виде плагина AdvancedGameUserInterface, базируется на архитектурных принципах, обеспечивающих гибкость, масштабируемость и эффективное использование ресурсов: шаблонизации интерфейсных окон, многослойной организации на основе стеков, адресации через Gameplay Tags с асинхронной за-

грузкой, а также динамической конфигурации настроек на основе данных. Проведенная интеграция системы в тестовый игровой проект подтвердила ее работоспособность. Оценка эффективности предложенного решения представлена в следующем разделе.

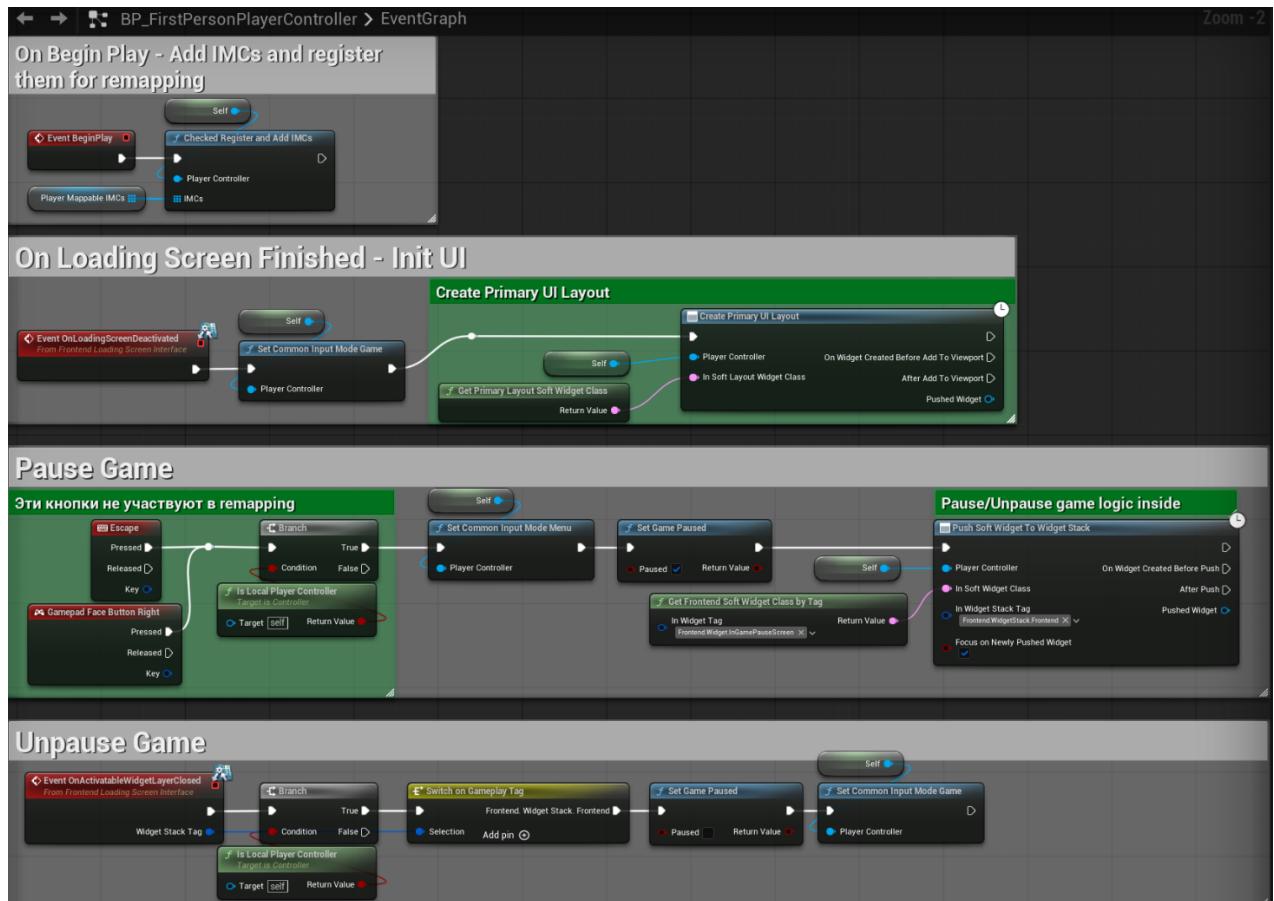


Рис. 14. Настройка контроллера тестового уровня.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДЛОЖЕННОГО РЕШЕНИЯ

Для оценки эффективности модульной системы пользовательского интерфейса, созданной на основе Common UI, в лабораторных условиях на базе Омского государственного технического университета была проведена ее экспериментальная апробация.

В ходе апробации на основе плагина AdvancedGameUserInterface в среде Unreal Engine 5.6 был реализован прототип пользовательского интерфейса, включающий все стандартные компоненты, как правило, задействованные в реальном игровом проекте:

- главное меню (WBP_MainMenuScreen);
- внутриигровой HUD;
- многостраничное меню настроек (графика, звук, управление);
- экран переназначения клавиш (WBP_KeyRemapScreen);
- диалоги подтверждения (WBP_ConfirmScreen).

Для сравнения с предложенным решением была реализована альтернативная версия на базе стандартного UMG (без использования Common UI), намеренно выполненная с применением типичных антипаттернов: весь пользовательский интерфейс был собран в едином «мастер-виджете» с жесткими ссылками на классы виджетов, без иерархии базовых классов стилей и без централизованного реестра настроек.

Целью экспериментального исследования было количественное сравнение предложенной архитектуры модульной системы пользовательского интерфейса с монолитной архитектурой по трем ключевым метрикам:

- 1) сопровождаемость (время внесения изменений);
- 2) производительность (потребление оперативной памяти);
- 3) масштабируемость (трудоемкость добавления нового функционала).

В экспериментальной апробации была задействована группа общей численностью 17 человек. Это бакалавры 4 курса, магистранты и аспиранты, имеющие опыт 2–5 лет в реализации реальных игровых проектов и работы с UMG: 12 разработчиков на Unreal Engine и 5 дизайнеров интерфейсов, работающих не только с Figma, но и с игровым движком.

Перед его началом все участники были ознакомлены с обоими вариантами реализации пользовательского интерфейса, а порядок предъявления условий в ходе эксперимента балансировался для исключения эффекта переноса навыков.

Представим полученные результаты.

Метрика № 1. Сопровождаемость – время внесения типовых изменений в пользовательский интерфейс.

Каждому из 17 участников предлагалось выполнить три типовые задачи в двух вариантах – монолитном и модульном:

- 1) смена гарнитуры шрифта для всех текстовых элементов;

- 2) изменение стиля оформления кнопок на нескольких экранах;
- 3) изменение цветовой схемы всех элементов управления.

Время выполнения каждого задания участниками эксперимента фиксировалось с момента его получения до момента визуального подтверждения корректности результата в Unreal Engine.

Среднее время выполнения задач в монолитном варианте составило: смена шрифта – 26.4 мин (SD = 4.7), смена стиля оформления кнопок – 34.2 мин (SD = 3.1), смена цветовой схемы – 31.8 мин (SD = 5.2). В модульном варианте соответствующие показатели таковы: 0.9 мин (SD = 0.2), 2.1 мин (SD = 0.4) и 1.3 мин (SD = 0.3).

Разброс результатов в монолитном варианте объясняется различным опытом участников в навигации по Blueprint-графам Unreal Engine. В модульном варианте высокая воспроизводимость результата обусловлена централизованным хранением стилей, шаблонной структурой интерфейса и использованием мягких ссылок.

Для проверки статистической значимости использован t-критерий Стьюдента для зависимых выборок. По всем трем задачам достигнуты статистически значимые различия ($p < 0.001$). Среднее сокращение времени выполнения типовой задачи составило 92.6%, что подтверждает высокую эффективность предложенной архитектуры с точки зрения сопровождаемости.

Метрика № 2. Производительность – потребление оперативной памяти.

Измерения проводились с помощью встроенного профайлера Unreal Engine. Для каждого из двух вариантов выполнялось 10 независимых запусков прототипа, в ходе которых фиксировалось пиковое потребление оперативной памяти в момент полной отрисовки главного меню. Результаты 10 запусков приведены в табл. 3.

Табл. 3. Пиковое потребление ОЗУ при открытии главного меню.

Запуск	Монолитный вариант, МБ	Модульный вариант, МБ	Экономия, МБ
1	438	372	–66
2	432	369	–63

3	435	370	-65
4	441	373	-68
5	434	368	-66
6	436	371	-65
7	433	369	-64
8	437	372	-65
9	439	370	-69
10	434	368	-66
Среднее (SD)	436 (± 3)	370 (± 2)	-66 (-15.1%)

Детализации структуры потребления памяти представлена в табл. 4: указаны объемы памяти, занятые после открытия главного меню (в модульном варианте UI-ресурсы загружаются по требованию).

Табл. 4. Детализация структуры потребления памяти.

Компонент	Монолитный вариант, МБ	Модульный вариант, МБ
Базовые ресурсы движка и игры	350	350
UI-ресурсы (виджеты, текстуры, шрифты)	86	20
Итого (пиковое ОЗУ)	436	370

В монолитном варианте жесткие ссылки на все виджеты принуждают движок загрузить полный граф зависимостей при инициализации. Суммарный объем UI-ресурсов в памяти при старте составил 86 МБ – все виджеты, текстуры и шрифты загружаются единовременно.

В модульном же варианте соответствие тегов и классов виджетов хранится в Developer Settings с использованием мягких ссылок (TSoftClassPtr). При открытии главного меню загружаются только непосредственно используемые экраны (WBP_MainMenuScreen и WBP_PressAnyKeyScreen), занимая около 12 МБ. Ресурсы экранов настроек и переназначения клавиш (еще ~8 МБ) остаются выгруженными до первого обращения, что обеспечивает отложенную загрузку.

Среднее пиковое потребление ОЗУ в монолитном варианте составило 436 МБ (SD = 3 МБ), в модульном – 370 МБ (SD = 2 МБ). Экономия составила 66 МБ (15.1%). Различия статистически значимы (t-критерий для независимых выборок: $t(18) = 54.2$; $p < 0.001$).

Важно подчеркнуть, что эффект накапливается по мере роста игрового проекта: добавление каждого нового экрана пользовательского интерфейса с жесткими ссылками увеличивает начальный объем занятой памяти, тогда как в модульной архитектуре новые экраны (если они не требуются на момент инициализации) не влияют на начальный объем потребляемой памяти.

Метрика № 3. Масштабируемость – трудоемкость добавления нового функционала.

Двенадцать разработчиков из группы эксперимента выполняли задачу по добавлению нового раздела в меню настроек. Требовалось создать раздел «Специальные возможности» (Accessibility), включив в него три новые настройки и перенеся две существующие настройки из других разделов. Каждый разработчик выполнял задачу дважды с перерывом в двое суток; в табл. 4 приведены средние значения по двум попыткам для каждого участника.

В монолитном варианте участникам эксперимента требовалось:

- 1) добавить функции для изменения и применения настроек в класс UTestGameUserSettings.h;
- 2) скопировать или вручную создать Blueprint-виджеты для каждого параметра новой вкладки;
- 3) переписать логику отображения и изменения параметров.

Соответственно, в модульной архитектуре задача решалась без внесения изменений в существующие Blueprint. В этом варианте участникам требовалось:

- 1) добавить функции для изменения и применения настроек в класс UFrontendGameUserSettings.h;
- 2) добавить enum-варианты для применения настроек;
- 3) обновить OptionsDataRegistry, добавив новую запись для представления данных на вкладке.

После этого система автоматически генерировала соответствующие виджеты при следующем открытии нужной вкладки экрана настроек.

Результаты измерений времени выполнения задачи участниками эксперимента приведены в табл. 5.

Среднее время выполнения в монолитном варианте составило 77 мин. (SD = 7 мин), в модульном – 9.8 мин (SD = 1.5 мин). Ускорение составляет 7.9 раза. Это сокращение времени на 87.3%. Различия статистически значимы (t-критерий для зависимых выборок: $t(11) = 28.6, p < 0.001$).

Важно подчеркнуть, что ни один из разработчиков в модульном варианте не вносил изменений в существующие Blueprint-виджеты, что позволило минимизировать их временные затраты и исключить риск внесения ошибок в уже работающий функционал прототипа интерфейса.

Обобщим результаты эксперимента (см. в табл. 6): данные, полученные по трем метрикам, демонстрируют статистически значимое превосходство созданной архитектуры модульной системы пользовательского интерфейса над монолитной.

Проведенная экспериментальная апробация с участием 17 начинающих специалистов по разработке видеоигр (12 разработчиков и 5 дизайнеров игровых интерфейсов) и техническими замерами позволила получить количественные подтверждения эффективности предложенной модульной архитектуры по всем трем заявленным метрикам.

Табл. 5. Время выполнения задачи по добавлению нового раздела меню настроек (среднее по двум попыткам).

Разработчики	Монолитный вариант, мин	Модульный вариант, мин	Ускорение (раз)

1	72	8	9.0×
2	78	10	7.8×
3	90	13	6.9×
4	66	9	7.3×
5	84	10	8.4×
6	75	9	8.3×
7	81	11	7.4×
8	69	8	8.6×
9	87	12	7.3×
10	73	9	8.1×
11	79	10	7.9×
12	70	8	8.8×
Среднее (SD)	77 (±7)	9.8 (±1,5)	~7.9×

Табл. 6. Сводные результаты экспериментального исследования.

Метрика	Задача	Монолитный вариант	Модульный вариант	Улучшение	Стат. значимость
Сопровождение ($n = 17$)	Смена шрифта	26.4 мин	0.9 мин	-96.6% (29.3×)	$t(16) = 24.8$; $p < 0.001$
	Смена стиля оформления кнопок	34.2 мин	2.1 мин	-93.9% (16.3×)	$t(16) = 47.8$; $p < 0.001$
	Смена цветовой схемы	31.8 мин	1.3 мин	-95.9% (24.5×)	$t(16) = 22.1$; $p < 0.001$

Производительность (10 запусков)	Пиковое ОЗУ	436 МБ	370 МБ	15.1% (–66 МБ)	$t(18) = 54.2;$ $p < 0.001$
Масштабируемость ($n = 12$)	Добавление нового раздела меню	77 мин	9.8 мин	–87.3% (7.9×)	$t(11) = 28.6;$ $p < 0.001$

Относительно метрики сопровождаемости, централизованное управление стилями через иерархию базовых классов сокращает время глобального изменения, например для смены шрифта – в 29.3 раза. Эффект достигается именно за счет введения иерархии стилевых классов: даже при использовании Common UI, но без централизованного хранения параметров оформления каждое изменение потребовало бы ручного редактирования каждого виджета.

Что касается производительности, применение мягких ссылок и асинхронной загрузки через механизм Blueprint Async Action снижает пиковое потребление оперативной памяти при открытии главного меню на 66 МБ (15.1%). Данный эффект накапливается пропорционально числу экранов в игровом проекте и особенно значим для платформ с ограниченными ресурсами (мобильные устройства, консоли прошлого поколения).

Относительно метрики масштабируемости, Data-Driven-подход сокращает для разработчиков игровых проектов трудоемкость добавления нового функционала, в частности при добавлении раздела настроек – в 7.9 раза. Ключевым результатом по данной метрике является полное отсутствие необходимости в изменении существующих Blueprint: расширение системы настроек сводится к конфигурированию реестра данных и добавлению нескольких строк кода в класс настроек.

Таким образом, совокупность полученных результатов подтверждает исходную гипотезу исследования: предложенная модульная архитектура позво-

ляет существенно снизить связанность компонентов пользовательского интерфейса и повысить эффективность разработки и сопровождения игровых интерфейсов на движке Unreal Engine.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящее исследование осуществлено для устранения ряда проблем, возникающих при стихийной разработке пользовательских интерфейсов в Unreal Engine, таких как высокая связанность компонентов, трудоемкость внесения изменений, неэффективное использование памяти и сложность масштабирования. Несмотря на наличие в игровом движке таких мощных инструментов, как Common UI, вопросы их использования для построения целостной и масштабируемой архитектуры остаются малоизученными.

Поставленная цель достигнута – создана и экспериментально апробирована архитектура модульной системы UI, предназначенная для игровых проектов, которые разрабатываются на движке Unreal Engine. Она реализована в виде отдельного плагина AdvancedGameUserInterface, что обеспечивает возможность повторного использования и расширения системы UI в различных игровых проектах.

Результаты экспериментального исследования подтвердили эффективность предложенного решения по трем ключевым метрикам – сопровождаемость, производительность и масштабируемость. В отличие от готовых плагинов, которые ускоряют внедрение, но при этом сложно кастомизируются под специфические требования проекта, созданная архитектура использует проверенные механизмы Common UI и UMG в качестве фундамента, надстраивая собственные уровни абстракции (иерархию стилей, многослойные стеки, адресацию через Gameplay Tags, динамическую систему настроек на основе данных), что позволяет избежать ограничений готовых решений без избыточных трудозатрат.

Предложенное решение имеет несколько ограничений. Прежде всего, архитектура имеет дополнительную сложность на начальном этапе проекта: создание иерархии классов, настройка тегов и реестров данных требуют времени и архитектурного мышления. Это не всегда целесообразно для небольших игровых проектов. Второе ограничение – это порог вхождения для новых разработ-

чиков: переход к многослойной архитектуре требует их обучения. Третье ограничение – это влияние модульной архитектуры на скорость компиляции и сборки игрового проекта в настоящем исследовании не оценивалось и требует дальнейшего изучения.

На основе полученных результатов сформулируем практические рекомендации. Для крупных проектов (AA/AAA) с длительным циклом разработки видеоигры модульная архитектура – это обоснованный выбор, который окупается при масштабировании и снижает затраты на сопровождение. Для проектов среднего размера ее стоит применять выборочно: централизованное управление стилями – в обязательном порядке, многослойные стеки – при сложном интерфейсе с перекрывающимися экранами, систему адресации через Gameplay Tags – при необходимости гибкой конфигурации виджетов. Для небольших проектов и прототипов достаточно выделять стили в отдельные ресурсы, избегать жестких ссылок и использовать мягкие ссылки для асинхронной загрузки.

Среди перспективных направлений для будущих исследований выделим два. Во-первых, это разработка методов автоматического тестирования UI в рамках предложенной архитектуры: модульность и слабая связанность компонентов создают необходимые условия для написания unit- и интеграционных тестов. Во-вторых, исследование применимости предложенных принципов многослойной организации, адресации через теги, Data-Driven-подхода к смежным игровым подсистемам, таким как инвентарь, диалоговые системы, внутриигровые магазины и др. Это позволит унифицировать архитектурные подходы не только для разработки пользовательского интерфейса, но и для всего игрового проекта в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ullmann G.C., Guéhéneuc Y.-G., Petrillo F., Anquetil N., Politowski C. SyDRA: An approach to understand game engine architecture // Entertainment Computing. 2025. Vol. 52, No. 100742. <https://doi.org/10.1016/j.entcom.2024.100832>
2. Wojtaszczyk D. Unlocking Cross-Platform UI with Unreal's Common UI. 2025. URL: <https://pixelantgames.com/blog/unlocking-cross-platform-ui-with-unreals-commonui/>

3. Chen L. Architecting UI Systems for Design Fidelity and Platform Consistency // TechRxiv. 2025. URL: <https://www.techrxiv.org/users/949700/articles/1322954-architecting-ui-systems-for-design-fidelity-and-platform-consistency>
4. YawLighthouse. UMG Slate Compendium: A Compendium Information Guide for UMG and Slate in Unreal Engine. URL: <https://github.com/YawLighthouse/UMG-Slate-Compendium/tree/main/languages/ru>
5. Epic Games. Common UI Overview.
URL: <https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/overview-of-advanced-multiplatform-user-interfaces-with-common-ui-for-unreal-engine>
6. Unreal Engine. UMG Best Practices. 2019.
URL: <https://www.unrealengine.com/en-US/tech-blog/umg-best-practices>
7. Ramač R., Mandić V., Taušan N., Rios N., Freire S., Pérez B., Castellanos C., Correal D., Pacheco A., Lopez G., Izurieta C., Seaman C., Spinola R. Prevalence, Common Causes and Effects of Technical Debt: Results from a Family of Surveys with the IT Industry // Journal of Systems and Software. 2022. Vol. 184, No. 111114. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2021.111114>
8. Nardone V., Muse B.A., Abidi M., Khomh F., Di Penta M. Video Game Bad Smells: What They Are and How Developers Perceive Them // ACM Transactions on Software Engineering and Methodology. 2023. Vol. 32, No. 4 (88). P. 1–35. <https://doi.org/10.1145/3563214>
9. Agrahari V., Chimalakonda S. A Catalogue of Game-Specific Anti-Patterns // Proceedings of the 15th Innovations in Software Engineering Conference (ISEC 2022). 2022. P. 1–10. URL: <https://dl.acm.org/doi/epdf/10.1145/3511430.3511436>
10. Bittner D., Hauser F., Engl F., Mottok J. Eye Movement Modelling Examples on Usability Heuristics // Proceedings of the 6th European Conference on Software Engineering Education (ECSEE'25). ACM. 2025. P. 106–114. <https://doi.org/10.1145/3723010.3723035>
11. Olsson T., Toll D., Wingkvist A., Ericsson M. Evolution and Evaluation of the Model-View-Controller Architecture in Games // Proceedings of the 4th International Workshop on Games and Software Engineering (GAS 2015). IEEE. 2015. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7169463>

12. Microsoft. The Model-View-ViewModel Pattern // .NET MAUI Documentation. 2024.

URL: <https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/architecture/maui/mvvm>

DEVELOPMENT OF MODULAR USER INTERFACE ARCHITECTURE FOR UNREAL ENGINE GAMES USING THE COMMON UI PLUGIN-FRAMEWORK

M. V. Shmatko¹ [0000-0002-7255-8885], A. D. Myakishev² [0009-0001-3985-7672]

^{1,2}*Omsk State Technical University, Omsk, Russia*

¹marin298@gmail.com, ²makisevaleksey537@gmail.com

Abstract

The paper is devoted to the development and experimental verification of a modular user interface architecture for game projects in Unreal Engine. The study identifies typical UI design antipatterns (monolithic widget structures, hard references, lack of abstraction, platform dependency) and provides an analysis of existing architectural approaches (Data-Driven UI, MVC, MVVM), demonstrating their limitations. The authors propose an architecture that integrates the Common UI framework, an asynchronous loading mechanism with soft references, the Gameplay Tags system, and a data registry for dynamic settings menu generation. The architecture is implemented as the AdvancedGameUserInterface plugin. Its experimental evaluation involving 12 developers and 5 UI designers confirmed the effectiveness of the proposed solution across three key metrics: maintainability, performance, and scalability. Based on the research results, practical recommendations are formulated for applying the developed architecture depending on the scale of the game project. The research findings can be used by developers to improve quality and reduce maintenance costs for user interfaces in game projects on Unreal Engine.

Keywords: *Unreal Engine, user interface, Common UI, modular architecture, Gameplay Tags, Data-Driven UI, antipatterns, maintainability, scalability, performance, game development.*

REFERENCES

1. Ullmann G.C., Guéhéneuc Y.-G., Petrillo F., Anquetil N., Politowski C. SyDRA: An approach to understand game engine architecture // Entertainment Computing. 2025. Vol. 52, No. 100742. <https://doi.org/10.1016/j.entcom.2024.100832>
2. Wojtaszczyk D. Unlocking Cross-Platform UI with Unreal's Common UI. 2025. URL: <https://pixelantgames.com/blog/unlocking-cross-platform-ui-with-unreals-commonui/>
3. Chen L. Architecting UI Systems for Design Fidelity and Platform Consistency // TechRxiv. 2025. URL: <https://www.techrxiv.org/users/949700/articles/1322954-architecting-ui-systems-for-design-fidelity-and-platform-consistency>
4. YawLighthouse. UMG Slate Compendium: A Compendium Information Guide for UMG and Slate in Unreal Engine. URL: <https://github.com/YawLighthouse/UMG-Slate-Compendium/tree/main/languages/ru>
5. Epic Games. Common UI Overview. URL: <https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/overview-of-advanced-multiplatform-user-interfaces-with-common-ui-for-unreal-engine>
6. Unreal Engine. UMG Best Practices. 2019. URL: <https://www.unrealengine.com/en-US/tech-blog/umg-best-practices>
7. Ramač R., Mandić V., Taušan N., Rios N., Freire S., Pérez B., Castellanos C., Correal D., Pacheco A., Lopez G., Izurieta C., Seaman C., Spinola R. Prevalence, Common Causes and Effects of Technical Debt: Results from a Family of Surveys with the IT Industry // Journal of Systems and Software. 2022. Vol. 184, No. 111114. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2021.111114>
8. Nardone V., Muse B.A., Abidi M., Khomh F., Di Penta M. Video Game Bad Smells: What They Are and How Developers Perceive Them // ACM Transactions on Software Engineering and Methodology. 2023. Vol. 32, No. 4 (88). P. 1–35. <https://doi.org/10.1145/3563214>

9. *Agrahari V., Chimalakonda S.* A Catalogue of Game-Specific Anti-Patterns // Proceedings of the 15th Innovations in Software Engineering Conference (ISEC 2022). 2022. P. 1–10. URL: <https://dl.acm.org/doi/epdf/10.1145/3511430.3511436>
10. *Bittner D., Hauser F., Engl F., Mottok J.* Eye Movement Modelling Examples on Usability Heuristics // Proceedings of the 6th European Conference on Software Engineering Education (ECSEE'25). ACM. 2025. P. 106–114. <https://doi.org/10.1145/3723010.3723035>
11. *Olsson T., Toll D., Wingkvist A., Ericsson M.* Evolution and Evaluation of the Model-View-Controller Architecture in Games // Proceedings of the 4th International Workshop on Games and Software Engineering (GAS 2015). IEEE. 2015. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7169463>
12. Microsoft. The Model-View-ViewModel Pattern // .NET MAUI Documentation. 2024. URL: <https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/architecture/maui/mvvm>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



ШМАТКО Марианна Владимировна – к. филос. н, доцент кафедры «Математические методы и информационные технологии в экономике» ОмГТУ. Сфера научных интересов – гейм-дизайн, UX-аналитика и юзабилити информационных систем. Сфера практической деятельности – цифровой маркетинг.

Marianna Vladimirovna SHMATKO – Candidate of Philosophical Sciences, associate professor at the Department Mathematical Methods and Information Technologies in Economics, Omsk State Technical University. Research interests: game design, UX analytics and usability of information systems. Practical activities: digital marketing.

email: marin298@gmail.com

ORCID: 0000-0002-7255-8885



МЯКИШЕВ Алексей Денисович – студент ОмГТУ, направление 09.03.02 «Информационные системы и технологии» (профиль – «Цифровые медиатехнологии, виртуальная и дополненная реальность»). Сфера научных интересов – программирование, разработка видеоигр, разработка игровых механик и интерфейсных решений.

Aleksei Denisovich MIAKISHEV – student at the Omsk State Technical University, majoring in 09.03.02 Information Systems and Technologies (specialization: “Digital Media Technologies, Virtual and Augmented Reality”). Research interests: programming, video game development, game mechanics and UI development.

email: makisevaleksey537@gmail.com

ORCID: 0009-0001-3985-7672

Материал поступил в редакцию 25 июня 2026 года

УДК 004.41+004.9+004.5

ИНСТРУМЕНТАРИЙ ДЛЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАЗРАБОТКИ НАРРАТИВНОГО КОНТЕНТА И ГЕЙМДИЗАЙНА В ИНДИ-RPG: РЕАЛИЗАЦИЯ НА ДВИЖКЕ GODOT

М. В. Шматко¹ [0000-0002-7255-8885], **Л. Р. Пономарев**² [0009-0009-9600-7824]

^{1, 2}*Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия*

¹marin298@gmail.com, ²oil294semrom@gmail.com

Аннотация

Статья посвящена разработке и оценке комплекса инструментов для оптимизации работы геймдизайнера с нарративным контентом и дизайном инди-RPG на движке Godot. Актуальность проведенного исследования обусловлена ростом числа независимых студий, работающих с Godot и аналогичными игровыми движками, что требует создания специализированных средств, компенсирующих отсутствие в них готовых решений для разработки RPG: построения диалоговых систем, проектирования пошаговых боев, управления катсценами и реализации комплексного пользовательского интерфейса.

На основе архитектурного анализа референсной игры Persona 5 Royal спроектирован инструментарий, обеспечивающий оптимизацию работы геймдизайнера и снижение его зависимости от программиста. Методологически исследование опиралось на выделение состояний игрока, независимых модулей и зон профессиональной ответственности, что позволило разработать пять инструментов. Оценка их эффективности проведена с участием 12 начинающих геймдизайнеров, включала замеры времени выполнения заданий, интервью и экспертное ранжирование.

Полученные результаты показали, что инструменты, не имеющие аналогов в Godot («Боевые сегменты», «Комплексный пользовательский интерфейс», «Диалоговая система»), получили высокие экспертные оценки; инструмент «Интерактивные объекты локаций», имеющий аналог в Godot, сократил время выполнения работ в среднем на 65.5%, а инструмент «Команды игровому окружению» не продемонстрировал эффективности и требует доработки.

Практическая значимость результатов состоит в создании готового к

внедрению инструментария, позволяющего инди-командам сокращать время разработки RPG и повышать автономность их геймдизайнеров.

Ключевые слова: инди-разработка, RPG, Godot, геймдизайн, нарративный дизайн, инструменты разработки, архитектура видеоигр, оценка эффективности.

ВВЕДЕНИЕ

При разработке инди-RPG¹ в условиях малой команды и ограниченных ресурсов ключевой проблемой становится обеспечение эффективного взаимодействия между программистом и геймдизайнером, особенно в части работ по созданию нарративного контента² и дизайна игры. Движок Godot, выбранный для проекта новой видеоигры «Кошечьи проделки» из-за его открытости и независимости от зарубежных платформ, предоставляет широкие возможности для кастомизации, однако не содержит полноценных готовых решений для типичных задач жанра RPG: построения диалоговых систем, проектирования пошаговых боев, управления катсценами³ и создания комплексного пользовательского интерфейса [1, 2]. Поэтому геймдизайнер вынужден постоянно обращаться к программисту либо тратить значительное время на изучение низкоуровневых механизмов движка Godot, что замедляет процесс разработки и повышает риск ошибок.

Актуальность решения отмеченной проблемы обусловлена ростом числа независимых студий, которые в условиях санкционных ограничений работают с движками, не предназначенными для решения узкоспециализированных задач разработки RPG, а также потребностью этих студий в сокращении времени вывода видеоигры на рынок [2, 3]. Для таких команд критически важно иметь инструментарий, позволяющий нетехническим специалистам самостоятельно ре-

¹ Инди-RPG (от англ. Independent Role-Playing Game) – это ролевая компьютерная игра, которая разрабатывается и издается малочисленной независимой командой без финансовой и организационной поддержки крупного издательства в игровой индустрии.

² Нарративный контент – это совокупность всех информационных и сюжетных материалов видеоигры (игровые элементы), которые раскрывают ее историю, мир и персонажей.

³ Катсцена (от англ. cutscene – «обрезанная сцена») – это кинематографическая вставка в видеоигре, во время которой управление игроком временно отключается для демонстрации диалогов или важных событий, развития сюжета и пр.

ализовать игровую логику, не нарушив целостности архитектуры и не создав дополнительной нагрузки на программиста.

Целью настоящего исследования была разработка комплекса инструментов, предназначенных для оптимизации работы геймдизайнера с нарративным контентом и дизайном инди-RPG на движке Godot и снижения его зависимости от программиста, и оценка его эффективности. Для достижения этой цели были решены задачи проектирования архитектуры префабов⁴, команд игровому окружению, диалоговой системы, а также проверки их эффективности в сравнении со стандартными инструментами движка Godot.

Практическая значимость работы состоит в создании готовых к использованию инструментов, которые могут быть внедрены в инди-проекты для сокращения времени разработки RPG, а также для снижения зависимости их геймдизайнеров от программистов. Разработанные решения закрывают функциональные ограничения движка Godot в области RPG и могут служить основой для дальнейшего развития инструментария в открытом сообществе.

ГЕЙМДИЗАЙН НОВОЙ ИНДИ-RPG

«Кошечьи проделки» – это новая инди видеоигра в жанре J-RPG⁵, создаваемая маленькой командой независимых разработчиков в рамках стартап-проекта. Начало работы над ней стало возможным благодаря победе в федеральном конкурсе «Студенческий стартап» от Фонда содействия инновациям РФ [4].

Аудиторию игры составляют подростки в возрасте 9–14 лет. Согласно классификации Бартла, основной профиль игроков – это «исследователи» (67%), второстепенный – «карьеристы» (33%) [5, 6]. Такие пользователи интересуются фэнтези и будут рады почувствовать в игре атмосферу восточнославянских сказок (см. рис. 1).

⁴ Префаб (сокращение от англ. prefabricated) – это заранее созданный и сохраненный шаблон игрового объекта (например, здания, персонажа, предмета), который можно многократно использовать при разработке видеоигры. Изменение исходного шаблона автоматически обновляет все его копии в игровом мире.

⁵ J-RPG (от англ. Japanese Role-Playing Game) – это поджанр компьютерных ролевых игр, зародившийся в Японии, для которого характерны линейный сюжет, пошаговые бои, управление готовой командой героев и аниме-стиль графики.



Рис. 1. Кадры геймплея новой инди видеоигры «Кошечьи проделки».

В новой интерпретации русских сказок Кошечей наводит страх на Русь, похищая чужих невест по всему царству. Все боятся бросить ему вызов, опасаясь его магических способностей. Однако Кошечей допускает роковую ошибку – похищает невесту главного героя. Последний, вопреки всем предупреждениям, отправляется в опасное приключение ради ее спасения. По мере развития сюжета через катсцены и диалоги главный герой собирает команду храбрых героев и раз и навсегда освобождает Русь от гнета Кошечей, переломив волшебную иглу – источник силы его зла.

Во время своего путешествия по Руси герои посещают разные локации: «Русский лес», «Черные горы», «Болото Кикиморы», «Змеиная пещера», «Бездонное море», «Целебное озеро», «Новгород» и «Замок Кошечей». Каждая из них обладает не только своим собственным визуальным колоритом, но и уникальными игровыми особенностями. Так, например, в локации «Русский лес» спрятан сундук Верлиоки, поэтому героям с помощью меча приходится «прорубиться» через его заросли, а затем с помощью лука сбить ключ с верхушки дерева, чтобы открыть его.

В каждой локации герои сражаются со встречающимися противниками в пошаговых боях с помощью магии и заклинаний. Так, они могут вначале заморо-

зить противников, а затем согреть. Тогда противники получают статус-эффект⁶ «Мокрый», что делает их уязвимыми к волшебным молниям героев [6].

Разработка новой видеоигры «Кошечьи проделки» осуществляется на движке Godot, чей открытый исходный код снижает риск внезапной блокировки программы на территории Российской Федерации. Однако он обладает одним существенным недостатком: движок не приспособлен для разработки JRPG. Его универсальность предполагает, что разработчики будут самостоятельно адаптировать его под свои нужды, создавая необходимые инструменты [7]. Поэтому необходимо было провести архитектурный анализ RPG, чтобы определить перечень инструментов, необходимых для ее разработки.

АРХИТЕКТУРНЫЙ АНАЛИЗ RPG КАК ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

RPG – это жанр видеоигр, в котором пользователь может погрузиться в роль виртуального персонажа и повлиять на ход событий в вымышленном мире путем принятия ключевых решений. Основной акцент в таких играх делается на прокачке персонажа через приобретение им способностей при повышении уровня, выполнении квестов, исследовании интерактивного мира и взаимодействии с NPC⁷ [8].

Жанр RPG может использоваться как основной, вокруг которого строится вся игра (The Witcher 3: Wild Hunt, Clair Obscur: Expedition 33, Kingdom Come: Deliverance II), так и как побочный, когда его механики используются не в полном объеме (Borderlands 3, Fallout 4, Atomic Heart) [9]. Помимо этого жанр включает в себя множество поджанров, каждый из которых сохраняет ядро RPG как основное, но при этом частично модифицирует правила игры. Чаще отличия заключаются в стиле повествования и боевой системе. Например, выделяют следующие поджанры: Japanese-RPG, Western-RPG, Action-RPG [10].

Жанр RPG характеризуется высокой системностью, когда все параметры

⁶ Статус-эффект – это временное воздействие на игрового персонажа или объект, которое изменяет его характеристики, поведение или внешний вид. Статус-эффекты могут быть как положительными, так и отрицательными, они обычно длятся определенное время или до совершения какого-то действия.

⁷ NPC (Non-Player Character) – это любой персонаж в видеоигре, которым управляет не игрок, а компьютер (искусственный интеллект).

игры взаимосвязаны между собой, и изменение параметра одного блока игры приводит к изменениям в другом. Мир зачастую открытый с высокой детализацией интерактивных элементов [9–11].

Исходя из особенностей выбранного жанра, крайне важно понять, как именно устроена такая видеоигра с точки зрения проектирования ее архитектуры, а именно:

- состояний игрока и переходов между ними;
- независимых модулей, которые используются в этих состояниях;
- вида профессиональной деятельности при работе с модулями.

Чтобы получить релевантные данные относительно архитектуры, разрабатываемой в рамках проекта RPG «Кошечские проделки», проанализируем ее прямой аналог по структуре катсцен и боевой системе – Persona 5 Royal.

Анализ архитектуры этого аналога позволил выделить четыре основных состояния игрока.

1. Исследовательский режим (пользователь перемещается по видеоигровому миру, ведет диалоги, собирает предметы, участвует в боях): это главное состояние игрока, в котором он обладает наибольшей свободой принимать решения о переходе в любое из других состояний.

2. Катсцена и диалоги (пользователь просматривает катсцену на движке видеоигры, зачастую с диалогом): выйти из этого состояния он не может до технического завершения катсцены.

3. Бой (пользователь сражается с противниками в пошаговом режиме): для выхода из этого состояния игроку требуется завершить бой с любым результатом – победа, поражение, побег.

4. Меню (пользователь просматривает, например, список персонажей, настройки игры, сохранения и пр.): в это состояние игрок может переходить только с помощью исследовательского режима, в отличие от предыдущих состояний, которые подразумевают перемещение между собой.

Кроме того, по критерию целостности (способности функционировать отдельно от друг друга) были определены независимые модули этих состояний игрока, а затем они были разделены на три зоны профессиональной ответственности:

- программирование: система загрузки сохранений, сохранение прогресса игры, модуль с основной информацией о мире игры, настройки игры;
- нарративная дизайн: видеоигровая локация, диалоговая система;
- геймдизайн: интерфейс игры, пошаговый бой, видеоигровые тела-триггеры.

На основе проведенного анализа архитектуры RPG Persona 5 Royal была составлена схема основных состояний игрока (см. рис. 2).

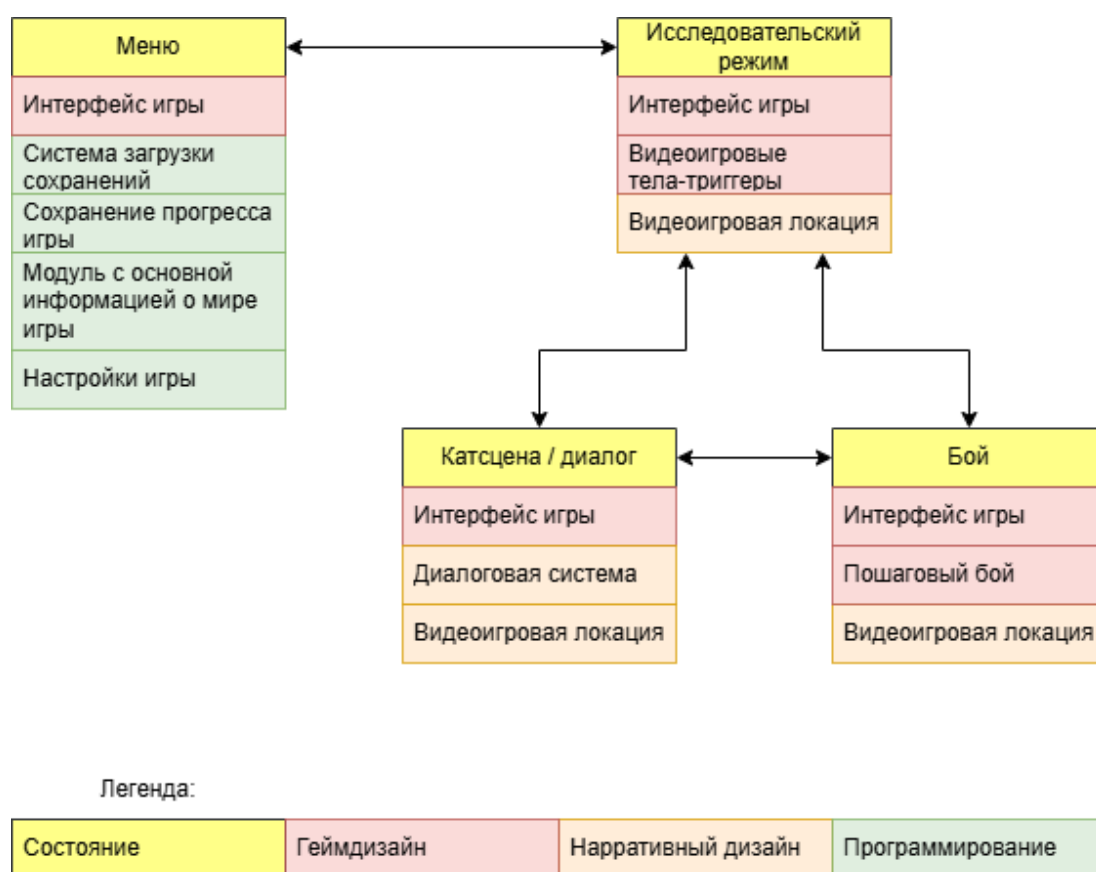


Рис. 2. Схема основных состояний игрока в видеоигре Persona 5 Royal.

В результате было установлено что эта архитектура требует высокой вовлеченности нетехнических специалистов: геймдизайнеры работают во всех четырех состояниях игрока, нарративные дизайнеры – в трех. Учитывая отсутствие у таких специалистов компетенций в программировании, их самостоятельное вмешательство в код видеоигры с целью решения своих профессиональных задач неизбежно приведет к нарушению его работы, в особенности при перемещении игрока между состояниями. В связи с этим разработка инструментов для

выполнения их работ приобретает критическое значение, обеспечивая функцию защитного барьера.

РЕАЛИЗАЦИЯ ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ С НАРРАТИВОМ И ДИЗАЙНОМ ИНДИ-RPG

Разработка новой RPG ведется малочисленной командой, состоящей из четырех человек: программиста, геймдизайнера, 3D-художника и 2D-художника. Из-за жестких временных ограничений этого проекта у каждого специалиста неизбежно происходят расширение зон ответственности и увеличение рабочей нагрузки.

Так, геймдизайнер в настоящей команде занимается не только проектированием игрового процесса, но и отвечает за нарратив, написание сценария и пользовательский интерфейс. Поэтому ему необходимы специализированные инструменты, которые, с одной стороны, снижают его зависимость от программиста, а, с другой – позволяют быстро и эффективно выполнять разнообразные задачи в рамках своих работ.

Для создания комплекса таких инструментов был проведен анализ всех направлений деятельности геймдизайнера в проекте и выделены основные проблемы, возникающие в ходе выполнения дизайн-работ:

- на основе инструментария, имеющегося у игрового движка Godot, геймдизайнеру приходится тратить много времени на создание интерактивных локаций;
- в игровом движке Godot отсутствует инструментарий, необходимый геймдизайнеру для создания боевых сегментов, запланированных в игре;
- в игровом движке Godot отсутствует возможность реализации комплексного пользовательского интерфейса игры.

В результате анализа деятельности геймдизайнера также были определены две проблемы, связанные с созданием нарративного контента:

- для создания в игровом движке Godot катсцен со сложными действиями геймдизайнеру не хватает встроенного AnimationPlayer;
- в игровом движке Godot отсутствует возможность создавать диалоги персонажей, предусмотренные концепцией игры.

При этом стоит отметить достаточно высокую адаптивность игрового движка Godot к изменениям, которая позволяет решать подобные проблемы путем создания дополнительного инструментария. Речь идет, прежде всего, об архитектуре нодов, с помощью которых можно создавать различные игровые объекты по принципу конструктора, комбинируя как встроенные элементы движка, так и кастомные компоненты [2; 7].

Итак, для решения проблем, выявленных в деятельности геймдизайнера, были созданы инструменты, направленные на оптимизацию его работ с нарративом и дизайном инди-RPG. Представим их перечень и детальное описание.

Инструмент № 1. «Интерактивные объекты локаций»

Для оптимизации работы геймдизайнера по созданию и настройке параметров различных интерактивных объектов: их реакций на внешние воздействия со стороны игрока и других объектов – был разработан специальный префаб. Чтобы применить его, геймдизайнеру необходимо сделать копию префаба интерактивного объекта, выбрать из списка необходимое с ним действие для его активации, затем добавить на игровую локацию префабы команд игровому окружению, которые будут производиться после активации объекта, а также загрузить компоненты внешнего вида объекта и специальные эффекты, сохранив изменения как новый префаб.

Рис. 3 демонстрирует процесс применения геймдизайнером этого инструмента: с его помощью параметры врага (интерактивного объекта) сейчас настроены таким образом, чтобы бой начинался только тогда, когда игрок окажется в зоне шара.

Инструмент № 2. «Боевые сегменты»

Для создания запланированных в игре боевых сегментов, в которых игровые персонажи будут сражаться друг с другом с помощью заклинаний, был создан набор префабов.

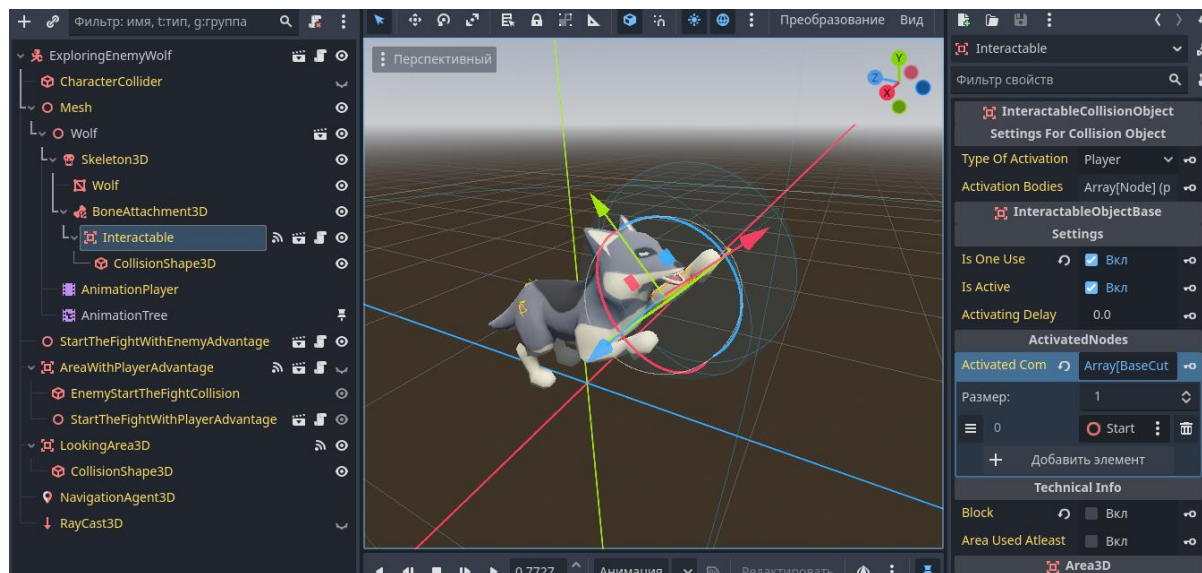


Рис. 3. Использование геймдизайнером префаба для настройки параметров реакции противника.

Чтобы применить его для решения этой задачи, геймдизайнеру необходимо выполнить ряд следующих последовательных действий.

1. Создать статус-эффекты, которые будут использоваться в заклинаниях: выбрать тип статус-эффекта (бафф⁸, дебафф⁹, горение, заморозка, мокрота, электрический шок и пр.), выбрать вариант его влияния (бафф/дебафф) на каждую из пяти запланированных характеристик персонажа (силу, ловкость, выносливость, интеллект, удачу), установить изменение его устойчивости к каждому из семи запланированных типов заклинаний (физическому, огненному, ледяному, ветренному, электрическому, скверному, святому), дать название статус-эффекту и определить его длительность, сохранив изменения как новый статус-эффект.

2. Создать заклинания, которые будут использоваться новым персонажем: создать копию префаба заклинания, выбрать один из семи типов запланированных заклинаний, установить подходящие для заклинания цели

⁸ Бафф – это положительное воздействие, улучшающее характеристики игрового персонажа и дающее ему дополнительные возможности и пр. Обычно применяется к себе или союзникам для повышения эффективности в бою или исследованиях.

⁹ Дебафф – это негативное воздействие, ухудшающее игрового персонажа. Снижает значения его характеристик, ограничивает набор действий, наносит периодический урон и пр. Обычно используется против врагов.

(например, для союзников или противников, для одного или для всех), определить стоимость, наносимый урон, количество восстанавливаемого здоровья и маны, после санкционировать аннулирование баффов и статус-эффектов, также назначить визуальные эффекты и статус-эффекты и выбрать типы воспроизводимых анимаций (использования и получения), сохранив все изменения как новое заклинание.

3. Создать персонажи, которые будут задействованы в боевых сегментах: для каждого из них необходимо создать копию префаба персонажа, добавить в префаб 3D-модель самого персонажа, заклинания, которые он будет применять, фазы ИИ, пассивную способность персонажа, затем определить порог перехода ИИ на каждую из фаз, составить список заклинаний для каждой фазы ИИ, определить значение характеристик персонажа и его устойчивости к каждому из семи запланированных типов заклинаний, ввести названия необходимых анимаций для разных игровых ситуаций (стандартной атаки, физической атаки, магической атаки, магического лечения, использования предмета, смены персонажа, побега с поля боя, защитной стойки, получения урона), сохранив изменения как новый персонаж.

На рис. 4 и 5 показан процесс применения геймдизайнером этого инструмента: с его помощью независимо созданы следующие боевые сегменты: статус-эффект «Стальная кожа», заклинание «Пламя», а также боевой персонаж «Кощей», необходимые для дальнейшего дизайна боевой системы.

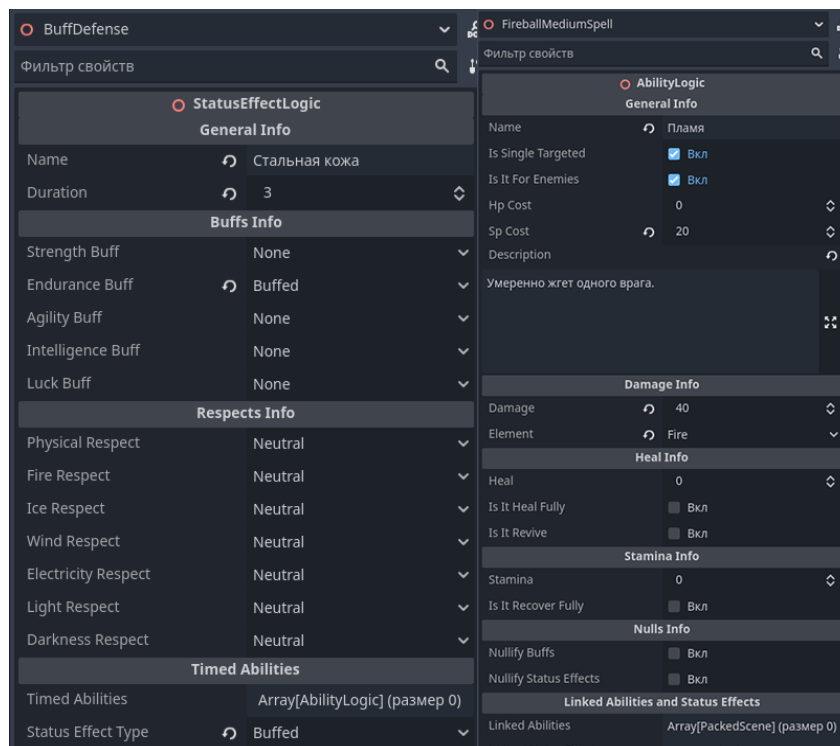


Рис. 4. Использование геймдизайнером префабов для создания статус-эффекта «Стальная кожа» и заклинания «Пламя».

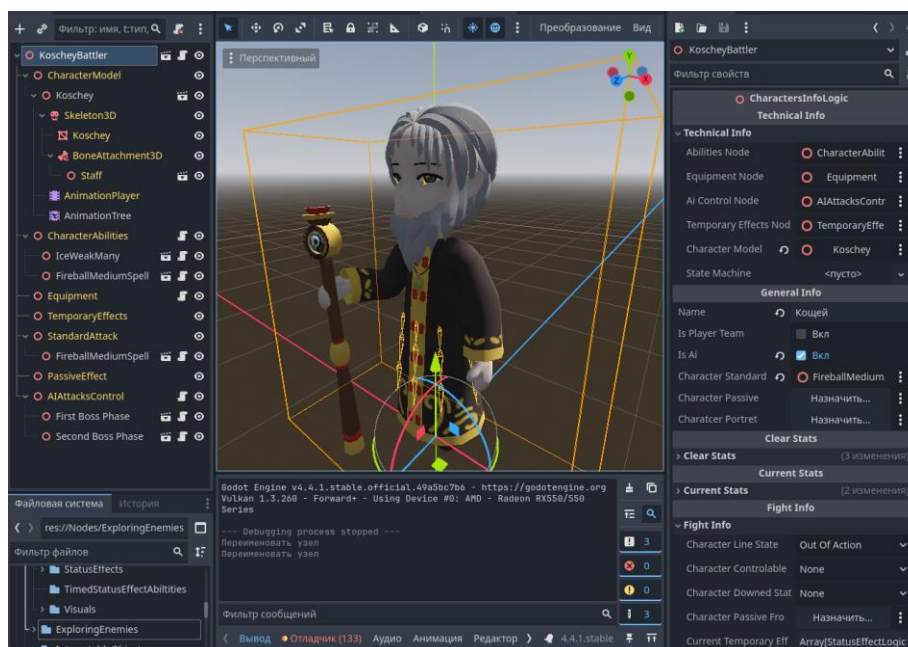


Рис. 5. Использование геймдизайнером префабов для создания боевого персонажа «Кошечей».

Инструмент № 3. «Комплексный пользовательский интерфейс игры»

Для реализации комплексного пользовательского интерфейса игры, способного корректно отображать смену основных состояний игрока, было разработано руководство для работы со специальной архитектурой интерфейса, интегрированной в видеоигру.

Согласно этому руководству геймдизайнеру необходимо сначала создать экран с требуемым набором элементов для взаимодействия с игрой (списками, изображениями, анимациями и пр.), затем создать обращающиеся к состоянию методы, а также методы, управляющие экраном, добавить на экран интерактивные элементы (кнопки, ползунки и пр.), привязать сигналы интерактивных объектов к вызову экранных методов, после этого сохранить новый экран и добавить его к соответствующему состоянию игрока.

На рис. 6 представлен процесс применения геймдизайнером разработанного руководства: с его помощью реализован экран игрового интерфейса, предназначенный для выбора игроком боевой способности.



Рис. 6. Экран игрового интерфейса «Выбор боевой способности».

На рис. 7 показано взаимодействие компонентов интерфейса после нажатия пользователем кнопки «Меню», которая провоцирует смену основного состояния игрока с «Исследование» на «Меню».

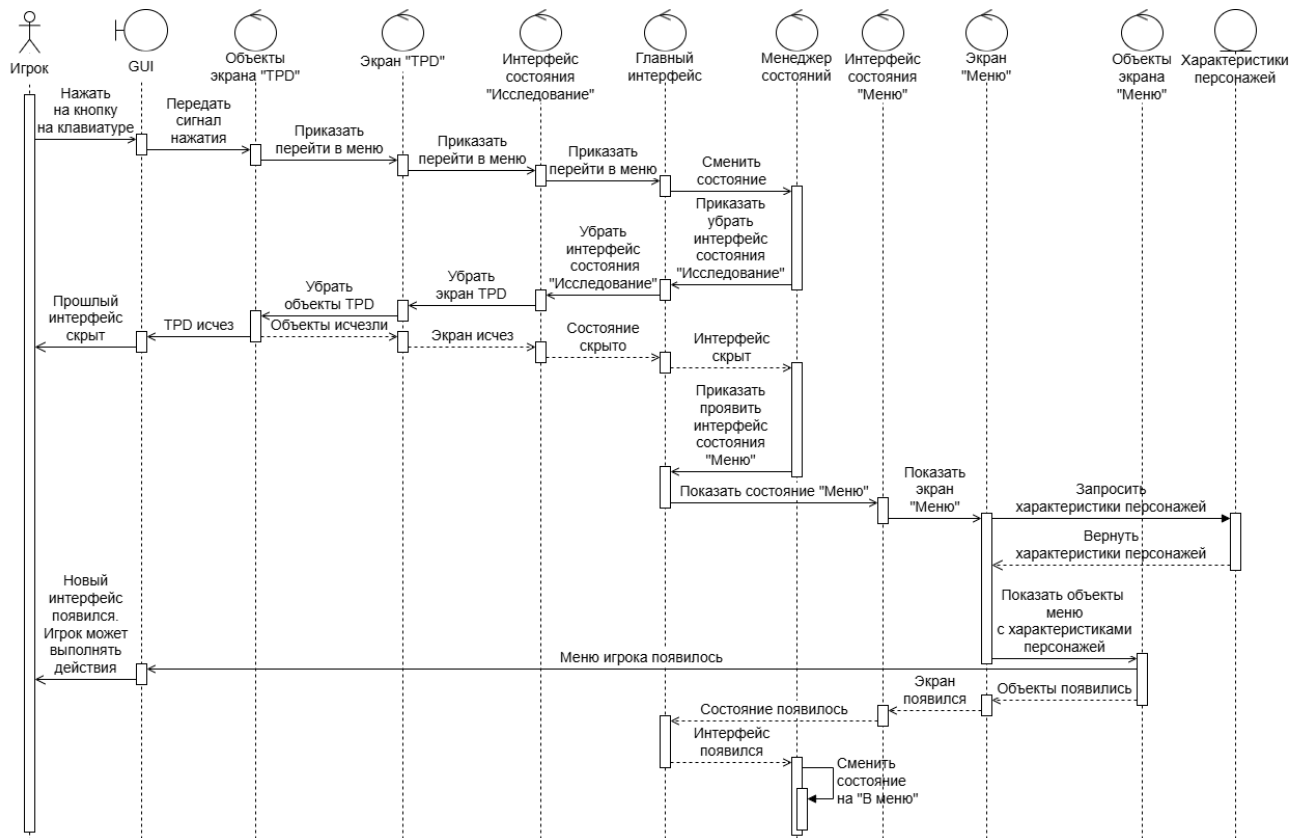


Рис. 7. Диаграмма последовательностей взаимодействия компонентов интерфейса после нажатия кнопки «Меню».

Теперь геймдизайнеру не нужно тратить время на проверку корректности отображения элементов интерфейса при смене состояний, и он может сосредоточиться на создании экранов, удобных и понятных игрокам.

Инструмент № 4. «Команды игровому окружению»

Чтобы геймдизайнер мог использовать сложные действия, например, в катсценах, боевых ситуациях и пр., необходимо было решить проблему нехватки инструментария стандартного `AnimationPlayer`, а именно возможности воздействовать на объекты видеоигрового мира. Для этого были созданы 12 префабов-команд:

- запустить анимацию стандартно;
- запустить анимацию плавно;
- прикрепить объект к другому объекту;
- сменить камеру;
- запустить несколько команд одновременно;

- добавить предмет в инвентарь;
- направить кость персонажа на объект;
- переместить объект;
- повернуть объект;
- дождаться выполнения нескольких команд;
- начать диалог;
- начать сражение.

Геймдизайнеру необходимо добавить на игровой уровень префаб-команду, задать задержку ее активации, а после – установить параметры, специфичные для каждой команды: например, для команды «Запустить анимацию» выбрать `AnimationPlayer`, ввести название анимации и скорость ее выполнения.

На рис. 8 показан процесс применения геймдизайнером этого инструмента: по ходу катсцены происходит активация команды «Направить кость персонажа на объект».

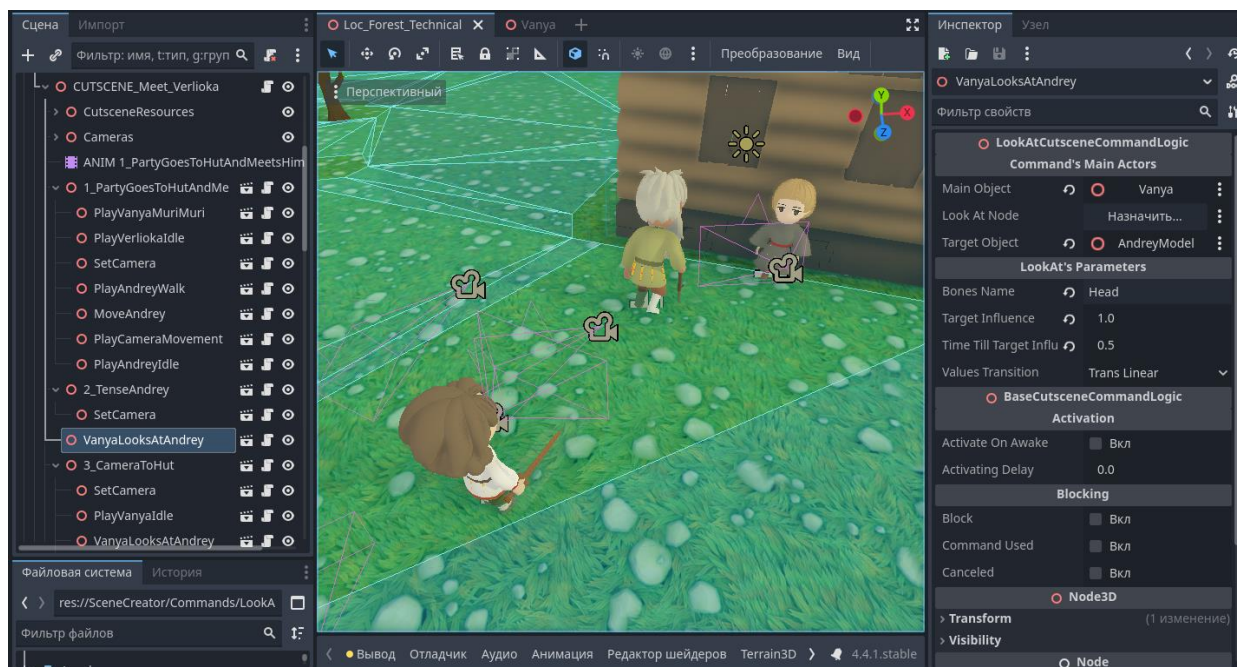


Рис. 8. Активация команды «Направить кость персонажа на объект» в катсцене видеоигры.

Инструмент № 5. «Диалоговая система»

Для создания диалогов персонажей, предусмотренных концепцией игры, были задействованы сторонний плагин DialogueManager и кастомный префаб CutsceneController. Чтобы применить их совместно, геймдизайнеру необходимо выполнить ряд последовательных действий: добавить на игровой уровень префаб CutsceneController и префабы команд игровому окружению, подчинить команды CutsceneController, установить настройки команд и ввести текст диалога средствами плагина DialogueManager, используя для вызова изменений в видеоигровом мире метод Exec (command_name: String), после этого добавить на игровой уровень команду «Начать диалог» и указать в ней ресурс диалога и CutsceneController.

На рис. 9 и 10 представлен результат применения геймдизайнером этого инструмента: пример настройки команд и ввода текста диалога средствами плагина DialogueManager, а также пример демонстрации диалога персонажа из катсцены видеоигры на движке Godot.

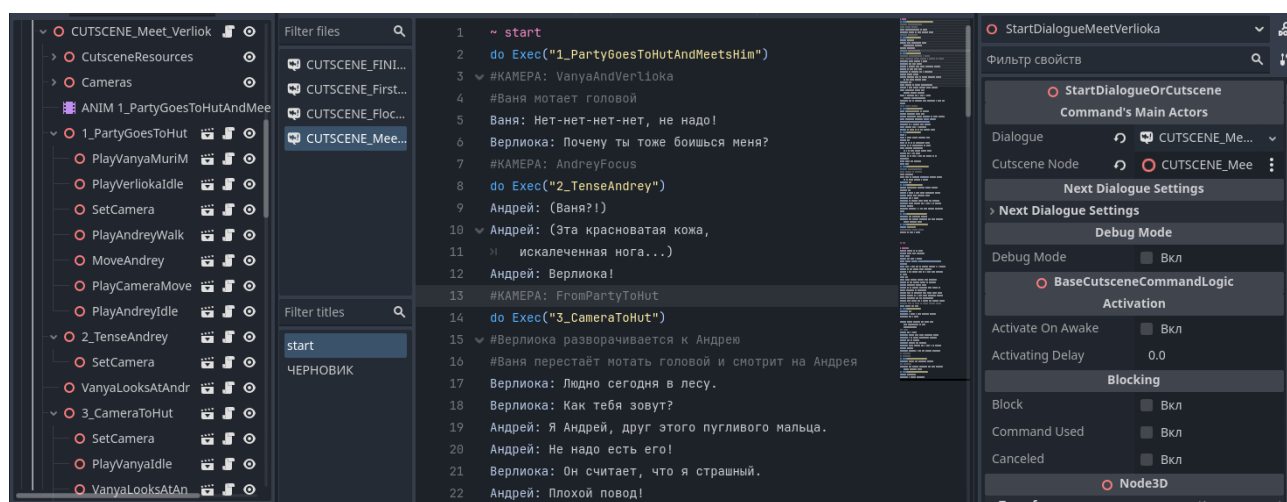


Рис. 9. Пример настройки команд и ввода текста диалога средствами плагина DialogueManager.



Рис. 10. Пример демонстрации диалога персонажа из катсцены на движке Godot.

На рис. 11 на примере катсцены продемонстрирован результат параллельного использования геймдизайнером разработанных инструментов для оптимизации работы с нарративом и дизайном инди-RPG «Кошечские проделки».



Рис. 11. Кадры катсцены инди-RPG «Кошечские проделки».

Таким образом, разработан и внедрен комплекс инструментов для оптимизации работы геймдизайнера, обеспечивающий его независимую работу с нарративным контентом и дизайном инди-RPG. Однако для оценки его реального потенциала и эффективности нужно было провести исследование с участием профильных специалистов из аналогичных инди-проектов.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТАННЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ РАБОТЫ С НАРРАТИВОМ И ДИЗАЙНОМ ИНДИ-ИГР

Оценка эффективности разработанных инструментов для работы с нарративом и дизайном инди-игр была проведена по следующей процедуре.

Этап 1. Формирование группы респондентов: в нее вошли 12 начинающих геймдизайнеров, ранее уже имевших опыт работы в инди-проектах. Один из респондентов – геймдизайнер проекта RPG «Кошечьи проделки», для которого непосредственно и был разработан инструментарий.

Этап 2. Тестирование инструментария и замеры времени: респондентам был выдан перечень заданий по работе с дизайном и нарративным контентом, которые необходимо было выполнить с использованием разработанных инструментов.

Инструменты «Интерактивные объекты локаций» и «Команды игровому окружению» были применены ими в сравнении с аналогичными инструментами, имеющимися в игровом движке Godot, а время, затрачиваемое на выполнение заданий с их помощью, измерялось и фиксировалось в таблице.

Этап 3. Проведение онлайн-интервью с геймдизайнерами, сбор и анализ первичных данных: по заранее разработанному гайду, состоящему из 11 открытых вопросов, был проведен опрос [12]. По результатам его анализа были выделены основные тезисы респондентов относительно разработанного инструментария.

Этап 4. Оценка эффективности разработанных инструментов и визуализация ее результатов: на этом этапе геймдизайнерам было предложено провести экспертную оценку разработанных инструментов по ключевым тезисам из интервью, используя 10-балльную шкалу, где +10 – высокая степень влияния на повышение эффективности работ, а –10 – высокая степень влияния на снижение эффективности работ.

Данные экспертной оценки были обработаны и сведены к средним значениям, а затем визуально представлены с помощью пузырчатых диаграмм: на них по горизонтальной оси (X) отображалась частота упоминания тезиса в ходе интервью с геймдизайнерами, а по вертикальной (Y) – экспертная оценка степени его влияния на повышение или снижение эффективности работы геймдизайнера.

Этап 5. Интерпретация данных оценки, формирование выводов и рекомендаций по совершенствованию инструментов для геймдизайнера.

Представим результаты оценки разработанных инструментов респондентами-геймдизайнерами.

Инструмент № 1. «Интерактивные объекты локаций»

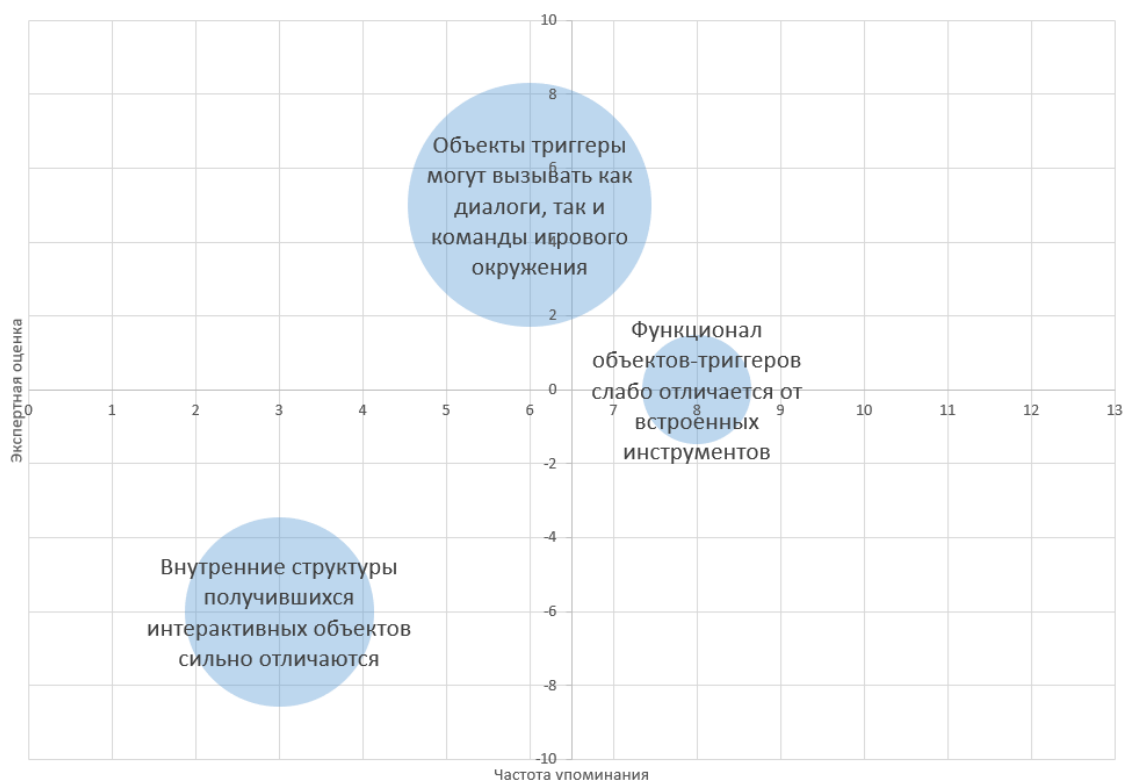


Рис. 12. Результаты экспертной оценки инструмента «Интерактивные объекты локаций».

В ходе интервью респонденты-геймдизайнеры высказывались достаточно нейтрально относительно применения этого инструмента. Результаты экспертной оценки демонстрируют, что для большинства геймдизайнеров разра-

ботанный инструмент «Интерактивные объекты локаций» по своим функциональным возможностям не показался более эффективным, чем аналогичный инструмент, уже имеющийся в игровом движке Godot (см. рис. 12).

Респонденты отметили положительное влияние разработанного инструмента на эффективность их работ за счет интеграции с системой команд игровому окружению, но выявили и отрицательный эффект – существенные различия во внутренних структурах полученных объектов.

Сравним теперь время, за которое в ходе тестирования геймдизайнеры выполняли задания по созданию интерактивных объектов как с помощью разработанного инструмента «Интерактивные объекты локаций», так и с помощью стандартного инструмента движка Godot – эрзац-решения из сигналов и встроенных нодов (см. табл. 1).

Табл. 1. Результаты измерения времени выполнения заданий по созданию интерактивных объектов инструментом движка Godot и разработанным инструментом «Интерактивные объекты локаций».

Задания для тестирования инструментов геймдизайнером	Среднее время выполнения задания стандартным инструментом движка Godot, с	Среднее время выполнения задания разработанным инструментом «Интерактивные объекты локаций», с	Изменение времени выполнения задания игровым дизайнером, %
Активация катсцены при входе персонажа в зону куба	83	27	–67.5
Уничтожение препятствия мечом	104	34	–67.3
Активация боя при атаке персонажа игрока	86	33	–61.6

Как видно из табл. 1, разработанный инструмент оказался эффективным для сокращения времени выполнения работ геймдизайнеров, снизив их продолжительность в среднем на 65.5%. Однако для повышения его эффективно-

сти следует расширить функционал, направленный на увеличение количества условий активации объекта (в том числе логических условий AND/OR), а также на отмену действия объекта, и стандартизировать его использование.

Инструмент № 2. «Боевые сегменты»

В ходе интервью респонденты-геймдизайнеры высказывались в целом положительно относительно применения этого инструмента. Ключевые тезисы их ответов следующие: «Всеобщность использования созданных персонажей и заклинаний», «Понятность использования инструмента», «Недостаточный набор настроек искусственного интеллекта».

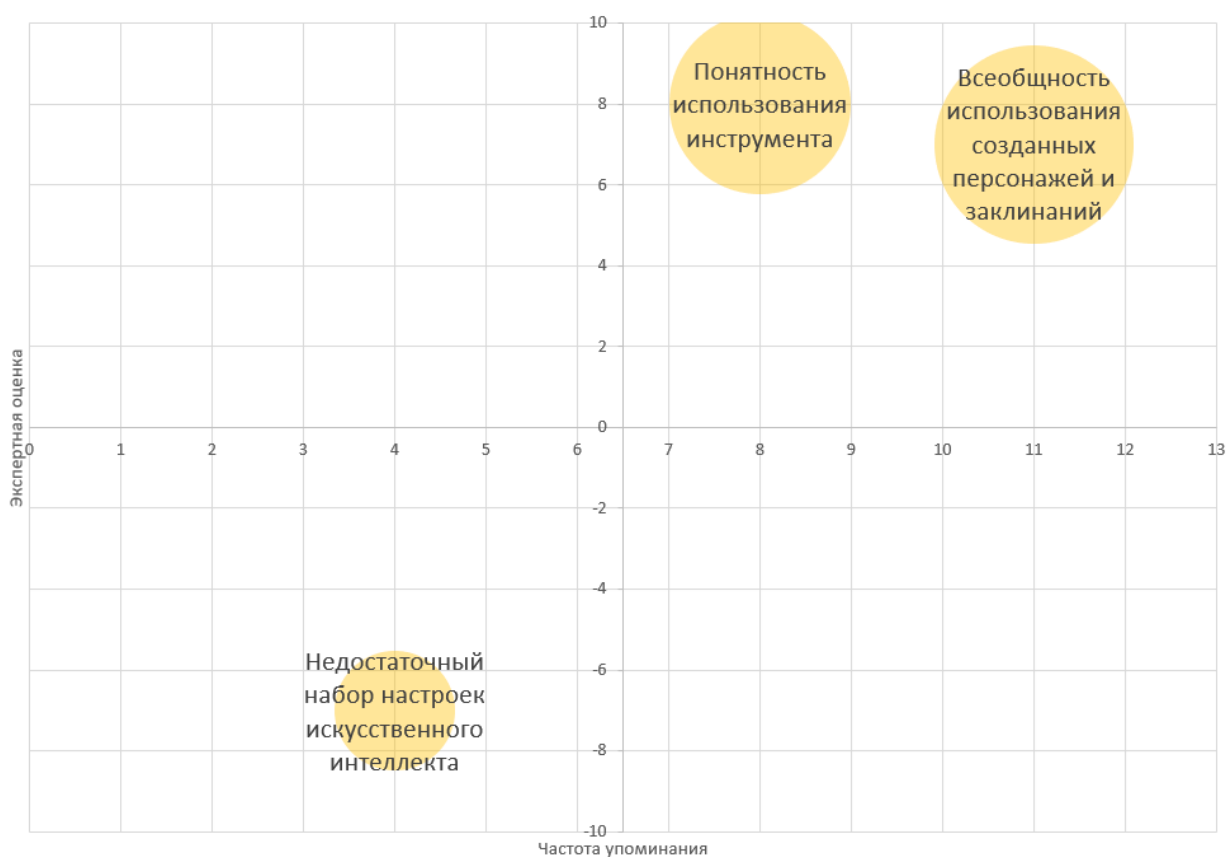


Рис. 13. Результаты экспертной оценки инструмента «Боевые сегменты».

Результаты экспертной оценки подтвердили, что большинство геймдизайнеров считают разработанный инструмент «Боевые сегменты», аналогов которому нет в игровом движке Godot, эффективным для дизайна боевых систем (см. рис. 13). Они также выявили и отрицательный эффект его внедрения – это ограниченность набора настроек искусственного интеллекта персонажей, что

является очевидным направлением для дальнейшей доработки этого инструмента.

Инструмент № 3. «Комплексный пользовательский интерфейс игры»

В ходе интервью респонденты-геймдизайнеры крайне позитивно отзывались о результатах применения этого инструмента. Ключевые тезисы их ответов следующие: «Легко применять методы для влияния на игру или получении информации о ней», «Понятная архитектура функционирования экранов внутри игры дает сосредоточиться на их содержимом», «Менеджмент архитектурой смены экранов и состояний», «Большое количество сигналов изменения интерфейса, которые можно использовать при создании экранов».

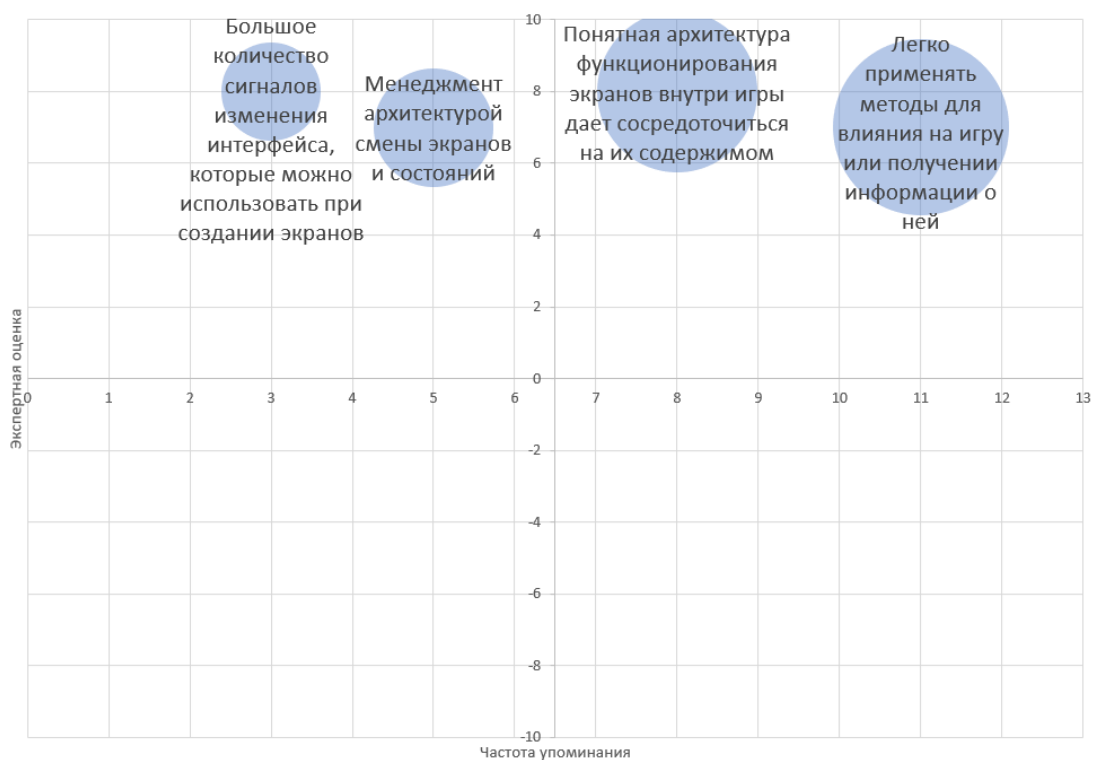


Рис. 14. Результаты экспертной оценки инструмента «Комплексный пользовательский интерфейс игры».

Экспертная оценка также подтвердила, что для всех геймдизайнеров инструмент «Комплексный пользовательский интерфейс игры» по своим функциональным возможностям является эффективным, особенно если учесть, что в игровом движке Godot аналогичных инструментов нет (см. рис. 14).

Инструмент № 4. «Команды игровому окружению»

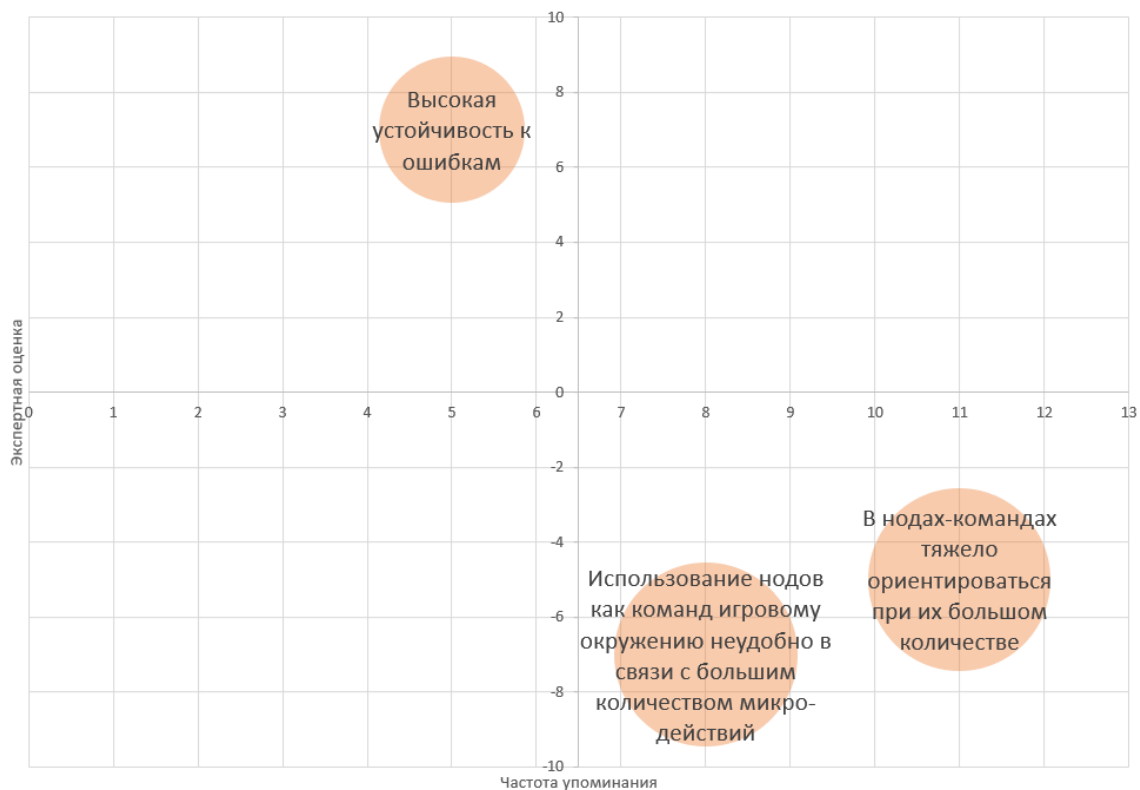


Рис. 15. Результаты экспертной оценки инструмента «Команды игровому окружению».

В ходе интервью большинство респондентов-геймдизайнеров критически отзывались о применении этого инструмента. Ключевые тезисы их ответов следующие: «В нодах-командах тяжело ориентироваться при их большом количестве», «Использование нодов как команд игровому окружению неудобно в связи с большим количеством микро-действий» и пр. Так, по экспертной оценке демонстрируется, что для геймдизайнеров инструмент «Команды игровому окружению» по своим функциональным возможностям не показался более эффективным, особенно в сравнении с аналогичным инструментом, уже имеющимся в игровом движке Godot (см. рис. 15). Они негативно оценили влияние разработанного инструмента на эффективность их работ, но при этом отметили и положительный эффект – это высокая устойчивость инструмента к ошибкам.

Сравним время, за которое в ходе тестирования геймдизайнеры выполняли задания по созданию катсцен как с помощью разработанного инструмен-

та «Команды игровому окружению», так и с помощью стандартного инструмента движка Godot – AnimationPlayer (см. табл. 2).

Табл. 2. Результаты измерения времени выполнения заданий по созданию катсцен инструментом движка Godot и разработанным инструментом «Команды игровому окружению».

Задания для тестирования инструментов геймдизайнером	Среднее время выполнения задания стандартным инструментом движка Godot, с	Среднее время выполнения задания разработанным инструментом «Команды игровому окружению», с	Изменение времени выполнения задания геймдизайнером, %
Создание катсцены по перемещению объекта из точки А в точку Б	51	63	+23.5
Создание катсцены из 5 передвижений и 5 поворотов объекта	135	249	+84.4
Создание катсцены с присоединением объекта к объекту	152	74	–51.3

Как видно из табл. 2, разработанный инструмент оказался крайне неэффективным и увеличивал время выполнения работ геймдизайнеров в среднем на 18.9%. Однако для повышения его производительности и удобства использования следует рассмотреть возможность произвести интеграцию разработанного инструмента в AnimationPlayer.

Инструмент № 5. «Диалоговая система»

В ходе интервью все респонденты-геймдизайнеры только положительно отзывались о своем опыте тестирования этого инструмента. Ключевые тезисы их ответов следующие: «Легко писать диалоги», «Высокая устойчивость к ошибкам», «Легко воздействовать на игровое окружение из диалога при помощи вызова команд игровому окружению» и пр. Результаты экспертной оценки также подтвердили, что для геймдизайнеров инструмент «Диалоговая система» является очень эффективным, его тестирование не выявило негативных эффектов и позволило выполнить задания, для которых в игровом движке Godot нет аналогичного инструмента (см. рис. 16).

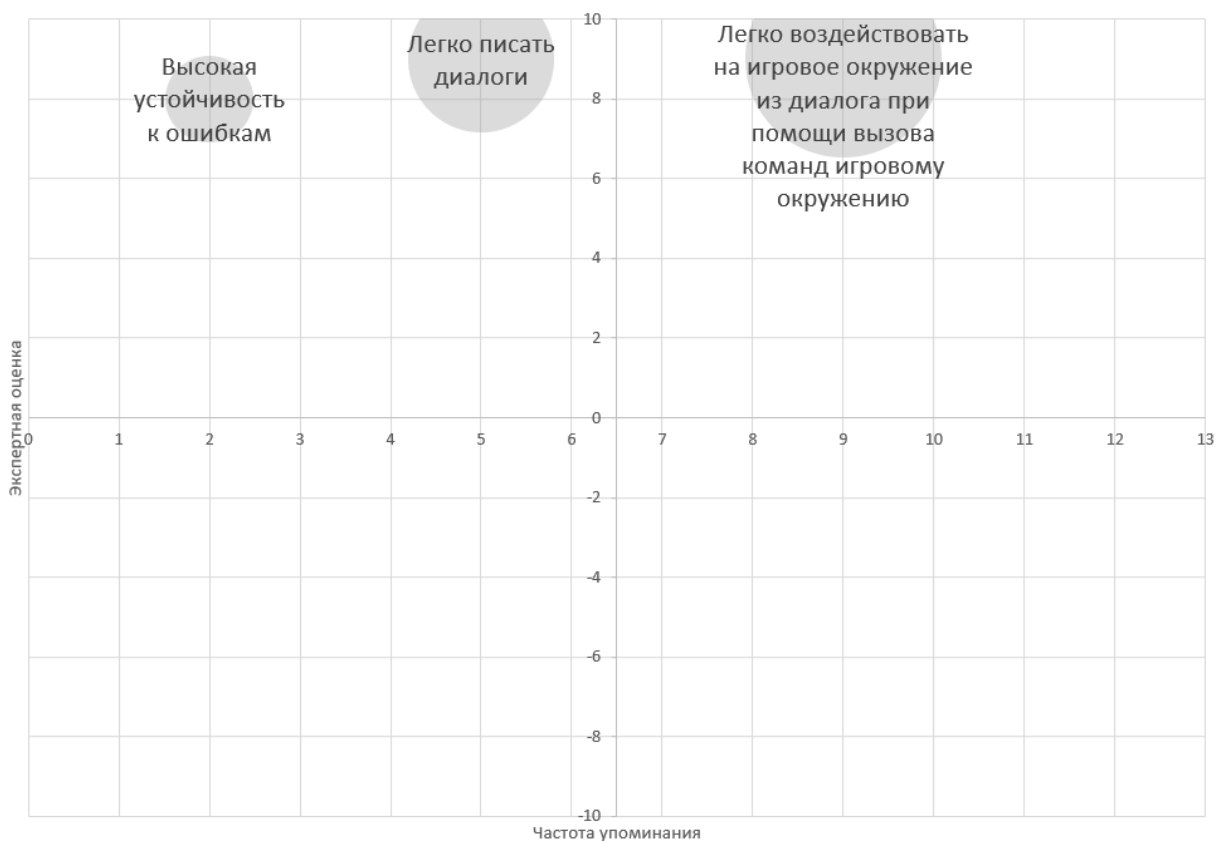


Рис. 16. Результаты экспертной оценки инструмента «Диалоговая система».

Подведем итоги оценки эффективности разработанных инструментов для работы с нарративом и дизайном инди-игр. Установлено, что их влияние на продуктивность геймдизайнеров и оптимизацию процесса их работы варьируется от крайне положительного до отрицательного.

Наибольшую эффективность показали инструменты, не имеющие аналоговых решений в игровом движке Godot, среди них – «Боевые сегменты», «Комплексный пользовательский интерфейс игры» и «Диалоговая система». Пользователи не выделили в них существенных недостатков, что, вероятно, объясняется отсутствием возможности прямого сравнения с аналогом. Теперь, когда создана собственная база инструментов, такое сравнение становится возможным в будущих исследованиях.

Незначительный положительный эффект был зафиксирован геймдизайнерами у инструмента «Интерактивные объекты локаций». Несмотря на ускорение процесса создания новых объектов (сокращение времени работы на 65.5%), они отметили его невысокую ценность в связи с функциональной близостью к аналогичному инструменту в игровом движке Godot.

Отрицательный эффект был обнаружен при использовании инструмента «Команды игровому окружению»: время выполнения задач с ним возрастает на 18.9% по сравнению со встроенным в Godot аналогом, что закономерно привело к его отрицательной оценке геймдизайнерами. Однако этот инструмент является полезным в узком контексте – при интеграции с другими разработанными инструментами («Диалоговая система» и «Интерактивные объекты локаций»). Он также может быть использован для решения более сложных задач, например для прикрепления предмета к кости персонажа, начала диалога или начала сражения и пр., которые нельзя реализовать с помощью аналогичного инструмента движка Godot.

Таким образом, часть предложенных инструментов может быть рекомендована к использованию при разработке инди-игр на движке Godot с учетом выявленных ограничений. Наиболее перспективными для внедрения являются инструменты, закрывающие функциональные пробелы этого движка, тогда как инструменты, дублирующие существующие возможности, требуют пересмотра их роли в проектных работах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан и протестирован комплекс инструментов для оптимизации работы геймдизайнера с нарративным контентом и дизайном инди-RPG на движке Godot. Работа опиралась на архитектурный анализ референсной игры

Persona 5 Royal, позволивший выделить ключевые состояния игрока, независимые модули и зоны профессиональной ответственности. На этой основе были созданы пять инструментов: префабы для интерактивных объектов локаций, конструктор боевых сегментов (статус-эффекты, заклинания, персонажи с ИИ), архитектура комплексного пользовательского интерфейса с управлением смежной экранов, система команд игровому окружению для катсцен и диалоговая система на базе плагина DialogueManager. Внедрение их в процесс разработки новой видеоигры «Кошечские проделки» позволило геймдизайнеру проекта продуктивно решить его профессиональные задачи без вмешательства в программную логику.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на доработку выявленных ограничений этих инструментов: расширение набора настроек искусственного интеллекта в инструменте «Боевые сегменты», интеграцию системы команд непосредственно в AnimationPlayer для повышения эргономичности, стандартизацию структуры интерактивных объектов. Перспективным представляется и анализ их влияния на процесс разработки видеоигр в других жанрах, а также в более крупных командах. Возможна открытая публикация инструментов для сообщества Godot с целью сбора обратной связи и дальнейшего улучшения.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Федеральному государственному бюджетному учреждению «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (Фонд содействия инновациям) за поддержку стартап-проекта по разработке ролевой видеоигры «Кошечские проделки».

ЛУДОГРАФИЯ

Atlus Co., Ltd. (2024) [2019.] *Persona 5 Royal* [видеоигра][загрузка, Blu-ray диск][PlayStation Vita, Nintendo Switch, PlayStation 4, PlayStation 5, Xbox One, Windows, Xbox Series X|S]. Sega Corporation.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Holfield J.* On the relevance of the Godot Engine in the indie game devel-

opment industry // arXiv. 2024. № arXiv:2401.01909.

2. *Ezhil S.* A Comparative Analysis of Unity, Unreal Engine, Godot, and CryEngine: Technical Features, Licensing Models, and Suitability for Modern Game Development.

3. RPG Games Market – Size, Share, Trends, Analysis & Forecast 2026–2035. URL: <https://markwideresearch.com/rpg-games-market/>

4. Программа «Студенческий стартап».
URL: <https://www.fasie.ru/programs/programma-studstartup/>

5. *Khouna J., Rhazal A., Ajana L., Mokri A.* Study of Some Key Elements of Design and Selection of an Educational Video Game Conducive to the Moroccan Secondary School Learners: The Motivational Profile and Pedagogical Coherence // Universal Journal of Educational Research. 2020. Vol. 8, No. 4. P. 1273–1282.

6. *Shmatko M.V., Kutuzov A.A., Ponomarev L.R.* Study of Gaming Experience and the Formation of a Cognitive Model of User Interaction with a New Video Game // Automatic Documentation and Mathematical Linguistics. 2025. Vol. 59 (Suppl. 3.). P. 208–219.

7. Godot Engine – Free and open source 2D and 3D game engine.
URL: <https://godotengine.org/>

8. *Winardy G., Septiana E.* Role, play, and games: Comparison between role-playing games and role-play in education // Social Sciences & Humanities Open. 2023. Vol. 8, No. 1. 100527.

9. *Qaffas A.* An Operational Study of Video Games' Genres // International Journal of Interactive Mobile Technologies (IJIM). 2020. Vol. 14, No. 15. P. 175–194.

10. *Domingues J.M., Filipe V., Carita A., Carvalho V.* Understanding the Impact of Perceived Challenge on Narrative Immersion in Video Games: The Role-Playing Game Genre as a Case Study // Information. 2024. Vol. 15, No. 6. No. 294. P. 1–23.

11. *Nodas A., Tjahjadi D., Rahman A.* The Implementation of RPG Concept on Breakout Games Using LibGDX Framework // Journal Online Informatika. 2021. Vol. 6, No. 2. P. 233–245.

12. *Adams W.* Conducting Semi-Structured Interviews // Handbook of Practical Program Evaluation. 2015. P. 492–505.

A TOOLKIT FOR PARALLEL DEVELOPMENT OF NARRATIVE CONTENT AND GAME DESIGN IN INDIE RPG: IMPLEMENTATION ON THE GODOT ENGINE

M. V. Shmatko¹ [0000-0002-7255-8885], L. R. Ponomarev² [0009-0009-9600-7824]

^{1, 2} Omsk State Technical University, Omsk, Russia

¹marin298@gmail.com, ²oil294semrom@gmail.com

Abstract

This paper presents the development and evaluation of a toolkit designed to optimize the workflow of game designers working with narrative content and game design for indie RPGs in the Godot engine. The relevance of this study stems from the growing number of independent studios utilizing Godot and similar game engines, which necessitates the creation of specialized tools to compensate for the lack of built-in solutions for RPG development, such as dialogue systems, turn-based combat design, cutscene management, and complex user interface implementation.

The aim of the work is to design a toolkit based on an architectural analysis of the reference game Persona 5 Royal, ensuring an optimized workflow for the game designer and reducing their dependence on the programmer. Methodologically, the research relied on identifying player states, independent modules, and areas of professional responsibility, which led to the development of five tools. Their effectiveness was evaluated with the participation of 12 novice game designers, including task completion time measurements, interviews, and expert ranking.

The results of the study showed that tools without analogues in Godot ("Combat Segments," "Complex User Interface," "Dialogue System") received high expert evaluations. The "Interactive Location Objects" tool, which has an analogue in Godot, reduced task completion time by an average of 65.5%. The "Commands to the Game World" tool did not demonstrate effectiveness and requires further improvement.

The practical significance of the research results lies in the creation of a ready-to-implement toolkit that enables indie teams to reduce RPG development time and increase the autonomy of their game designers.

Keywords: indie development, RPG, Godot, game design, narrative design, development tools, video game architecture, efficiency evaluation.

LUDOGRAPHY

Atlus Co., Ltd. (2024) [2019.] *Persona 5 Royal* [видеоигра][загрузка, Blu-ray диск][PlayStation Vita, Nintendo Switch, PlayStation 4, PlayStation 5, Xbox One, Windows, Xbox Series X|S]. Sega Corporation.

REFERENCES

1. *Holfield J.* On the relevance of the Godot Engine in the indie game development industry // arXiv. 2024. № arXiv:2401.01909.
2. *Ezhil S.* A Comparative Analysis of Unity, Unreal Engine, Godot, and CryEngine: Technical Features, Licensing Models, and Suitability for Modern Game Development.
3. RPG Games Market – Size, Share, Trends, Analysis & Forecast 2026–2035. URL: <https://markwideresearch.com/rpg-games-market/>
4. Программа «Студенческий startup». URL: <https://www.fasie.ru/programs/programma-studstartup/>
5. *Khouna J., Rhazal A., Ajana L., Mokri A.* Study of Some Key Elements of Design and Selection of an Educational Video Game Conducive to the Moroccan Secondary School Learners: The Motivational Profile and Pedagogical Coherence // Universal Journal of Educational Research. 2020. Vol. 8, No. 4. P. 1273–1282.
6. *Shmatko M.V., Kutuzov A.A., Ponomarev L.R.* Study of Gaming Experience and the Formation of a Cognitive Model of User Interaction with a New Video Game // Automatic Documentation and Mathematical Linguistics. 2025. Vol. 59 (Suppl. 3). P. 208–219.
7. Godot Engine – Free and open source 2D and 3D game engine. URL: <https://godotengine.org/>
8. *Winardy G., Septiana E.* Role, play, and games: Comparison between role-playing games and role-play in education // Social Sciences & Humanities Open. 2023. Vol. 8, No. 1. 100527.
9. *Qaffas A.* An Operational Study of Video Games' Genres // International Journal of Interactive Mobile Technologies (iJIM). 2020. Vol. 14, No. 15. P. 175–194.

10. *Domingues J.M., Filipe V., Carita A., Carvalho V.* Understanding the Impact of Perceived Challenge on Narrative Immersion in Video Games: The Role-Playing Game Genre as a Case Study // *Information*. 2024. Vol. 15, No. 6. No. 294. P. 1–23.

11. *Nodas A., Tjahjadi D., Rahman A.* The Implementation of RPG Concept on Breakout Games Using LibGDX Framework // *Journal Online Informatika*. 2021. Vol. 6, No. 2. P. 233–245.

12. *Adams W.* Conducting Semi-Structured Interviews // *Handbook of Practical Program Evaluation*. 2015. P. 492–505.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



ШМАТКО Марианна Владимировна – к. филос. н, доцент кафедры «Математические методы и информационные технологии в экономике» ОмГТУ. Сфера научных интересов – гейм-дизайн, UX-аналитика и юзабилити информационных систем. Сфера практической деятельности – цифровой маркетинг.

Marianna Vladimirovna SHMATKO – Candidate of Philosophical Sciences, associate professor at the Department Mathematical Methods and Information Technologies in Economics, Omsk State Technical University. Research interests: game design, UX analytics and usability of information systems. Practical activities: digital marketing.

email: marin298@gmail.com

ORCID: 0000-0002-7255-8885



ПОНОМАРЕВ Лев Романович – студент ОмГТУ, направление 09.03.02 «Информационные системы и технологии» (профиль – «Цифровые медиатехнологии, виртуальная и дополненная реальность»). Программист ООО «ИГРЫ ДЕЛАЮТ». Сфера научных интересов – игровой дизайн, игровые механики, игровая сценаристика, разработка видеоигр.

Lev Romanovich PONOMAREV – student at Omsk State Technical University, majoring in 09.03.02 Information Systems and Technologies (specialization: «Digital Media Technologies, Virtual and Augmented Reality»). Programmer of the «IGRY DELAYUT» company. Research interests: game design, game mechanics, game storytelling, video game development.

email: oil294semrom@gmail.com

ORCID: 0009-0009-9600-7824

Материал поступил в редакцию 22 апреля 2026 года

РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОСВЕЩЕНИЯ С УЧЕТОМ КОГНИТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ

Е. Р. Зяблова^[0000-0002-1321-883X]

Южный федеральный университет, г. Таганрог, Россия

ermuntyan@sfedu.ru

Аннотация

Рассмотрен подход к разработке интеллектуальной системы управления освещенностью рабочего пространства, корректирующей интенсивность света на основе анализа когнитивного состояния пользователя. Адаптация освещения осуществляется в реальном времени с использованием данных нейроинтерфейса BrainBit EEG Waves для регистрации электроэнцефалографии (ЭЭГ). С помощью спектрального анализа ЭЭГ устанавливаются показатели концентрации внимания и эмоционального расслабления, которые используются как управляющие параметры для умной лампы. В качестве умной выбрана лампа Yeelight LED Bulb W3. Управление освещением осуществляется локально, по протоколу LAN Control без передачи данных в облачные сервисы. Экспериментальные исследования подтвердили работоспособность системы, низкую задержку реакции и повышение субъективного комфорта пользователя. Разработанная система может быть использована для повышения эффективности образовательного процесса студентов.

Ключевые слова: интеллектуальное освещение, когнитивные характеристики, информационные потоки, нейроинтерфейс BrainBit EEG Waves, адаптивная среда, умный дом.

ВВЕДЕНИЕ

В процессе цифровой трансформации инженерное образование сопровождается активным внедрением интеллектуальных информационных технологий, направленных на повышение эффективности учебного процесса и формирование профессиональных компетенций обучающихся.

Современное образование требует от студентов длительной концентрации внимания, работы с выполнением сложных аналитических и проектных задач.

При таких условиях особое значение приобретают характеристики образовательной среды, в частности параметров освещения в рабочих зонах.

Было установлено, что характеристики искусственного освещения оказывают существенное влияние на психофизиологическое состояние человека, уровень утомляемости и когнитивную продуктивность [1].

Цветовая температура и интенсивность света способны изменять функциональное состояние центральной нервной системы, воздействуя на циркадные ритмы и механизмы регуляции бодрствования [2, 3].

Большинство существующих систем управления освещением использует статические сценарии или ориентируется на внешние параметры среды, без учета особенностей пользователя [4, 5]. Задача учета персональных характеристик пользователей при проектировании систем управления освещением позволяет открыть перспективы создания нейроадаптивных решений, предназначенных для управления элементами образовательной и трудовой обстановки.

Интересно исследовательское направление, связанное с использованием графовых подходов для решения поставленной задачи. Так, например, в работе [6] предложено использование графового подхода для моделирования различных сценариев освещенности в заданном уличном пространстве, что позволяет уменьшить сложность алгоритмов управления. Авторы представили результаты, показывающие, что использование данного подхода значительно упрощает построение алгоритмов, основанных на задании правил для управления искусственным освещением с использованием технологий искусственного интеллекта.

В статье [7] предложена интеграция метода излучательности в архитектуру кадрового орграфа с целью оптимизации потребления памяти графического процессора. Однако предложенные графовые модели не допускают разнотипность связей и/или вершин графа. В работе [8] дано описание нечеткого графа с разнотипными вершинами и множественными разнотипными связями, показаны преимущества его использования, в частности снижение времени анализа системы.

Необходимость использования таких моделей возникает при решении практических задач в сложных организационно-технических системах (см.

например, [9, 10]). Следует отметить, что применение таких графов для разработки интеллектуальной системы управления освещенностью пока является перспективным направлением и лежит за рамками настоящей работы.

Анализ опубликованных результатов исследований в области решения задачи управления освещенностью показал, что известные разработки не позволяют учесть когнитивные особенности пользователей.

Настоящее исследование направлено на создание адаптивной системы регулирования уровня освещения, опирающейся на анализ познавательных особенностей конкретного пользователя, и подтверждение ее пригодности для внедрения в учебные программы инженерной подготовки.

Учет когнитивных особенностей пользователя при реализации интеллектуальной системы управления освещенностью рабочего пространства составляет новизну предложенного подхода [5].

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОСВЕЩЕНИЯ НА КОГНИТИВНЫЕ СОСТОЯНИЯ

Этапы эволюции систем управления освещением представлены на рис. 1. На этапе механического контроля использовались выключатели с ручным управлением.

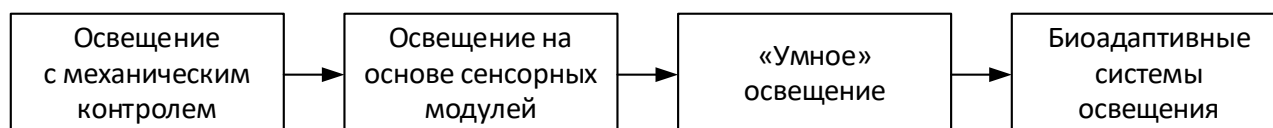


Рис. 1. Эволюция систем управления освещением: от автоматизации к персонализации.

Внедрение сенсорных модулей, фиксировавших перемещение людей и интенсивность естественного света, обеспечило возможность самодействующего управления освещением, свет запускался при регистрации присутствия и прекращался, когда внешний поток света достигал требуемой яркости. В описанный период такие решения начали функционировать без постоянного вмешательства оператора, однако их архитектура и набор функций оставались достаточно элементарными.

Использование сетевых IoT-систем и распространение протоколов Wi-Fi, Zigbee и Bluetooth привели к появлению «умного» освещения. Устройства объ-

единили в сети, управляемые через мобильные приложения или голосовых ассистентов, что позволило создавать сложные сценарии и расписания. Процесс освещения перестал относиться только к эксплуатационным задачам. В настоящее время свет представляет собой средство дистанционной модуляции нервных процессов.

Новый этап развития освещения ориентирован на внедрение биоадаптивных решений с применением биологических петель обратной связи. В подобных разработках функция управляющего сигнала возлагается на физиологические маркеры самого человека. В качестве таких маркеров могут выступать простые индикаторы, например пульс или изменения электрической проводимости кожи, а также более сложные и содержательные показатели, регистрируемые при записи электроэнцефалограммы (ЭЭГ). ЭЭГ обеспечивает непосредственный доступ к динамике мозговых ритмов и позволяет с большой точностью определять актуальную степень умственной активности [3].

Эмпирические данные свидетельствуют о том, что световые импульсы прицельно трансформируют психофизиологический профиль человека, отражаясь на эмоциональном тоне, устойчивости внимания и циркадных ритмах. Наблюдение о том, что оптические стимулы воздействуют не только на органы зрения, но и на мозговые сети, стало катализатором междисциплинарных работ, объединяющих разработки в области светотехники и нейронауки [1].

На физиологическом уровне наивысшая чувствительность нервной регуляторной системы человека проявляется в реакции на два базовых параметра освещенности:

- температуру цветового восприятия (измеряется в единицах Кельвина, К);
- распределение мощности по длинам волн.

Эти свойства света влияют не только на зрительную обработку информации, но и активируют незрительные биологические процессы, которые изменяют физиологическое состояние человека.

Параметры искусственного освещения выступают в роли определяющего фактора, модифицирующего показатели умственной активности человека. При сочетании повышенной световой интенсивности с более холодным цветовым

спектром (4000–6500 К) наблюдаются рост уровня бдительности, ускорение ответов и улучшение способности к сосредоточению. Для обстановки, ориентированной на расслабление и уменьшение уровня эмоциональной напряженности, оптимальными считаются теплые оттенки в диапазоне 2700–3500 К [3, 11].

Все выше отмеченное приобретает особую значимость в сфере подготовки инженеров, обучающимся часто приходится выполнять задания, связанные с большой интеллектуальной нагрузкой, такие как разработка программного обеспечения, построение моделей в CAD-пакетах, изучение документации по техническим вопросам и задачи оптимизации и др. Обеспечение должного уровня фокусировки и снижение вероятности ранней утомляемости являются определяющими условиями повышения эффективности учебного процесса.

Записи ЭЭГ принимают за объективный ориентир при индивидуальной подстройке параметров световой среды. Спектральное распределение мощности в этих записях отражает степень текущей познавательной активности. Доминирование бета-ритмов в интервале 13–30 Гц обычно сопряжено с интенсивной мыслительной работой и усиленной концентрацией внимания. При снижении когнитивной нагрузки и переходе к расслаблению увеличивается энергия в альфа- (8–13 Гц) и тета-диапазонах (4–8 Гц) [4, 12].

Применение показателей ЭЭГ в системах контроля микросреды открывает возможность внедрения подходов, обеспечивающих объективность и персональную адаптацию при корректировке параметров освещения [13, 14]. В противоположность принятым статичным стандартам яркости, характерным для многих учебных помещений, рассматриваемая технология ориентируется на текущую степень когнитивной активности отдельного обучающегося в режиме онлайн.

Разработанная адаптивная система регулирования освещения выполняет роль целенаправленного обучающего ресурса. Она нацелена на сохранение стабильной концентрации при решении сложных инженерных задач и уменьшение вероятности умственной усталости во время продолжительной работы за компьютером. Система помогает обучающимся развивать когнитивные навыки, включая осознание собственного состояния и понимание того, как окружение влияет на их продуктивность. Она также способствует становлению профессиональных

компетенций в сфере человеко-компьютерных интерфейсов и нейроадаптивных решений.

Внедрение таких технологий в систему обучения согласуется с положениями метода, ориентированного на когнитивные процессы при формировании учебной среды. При этом возникают дополнительные возможности для повышения уровня подготовки инженеров в условиях цифровых преобразований.

АРХИТЕКТУРА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Развернутое решение действует в единственном процессе на отдельном вычислительном узле, например на настольном персональном компьютере или плате Raspberry Pi. Все вычисления и управляющие процедуры выполняются непосредственно на самом устройстве и не зависят от удаленных серверов или облачных решений; такой выбор повышает независимость и устойчивость работы. Предложенный комплекс организует замкнутый цикл адаптивного регулирования световой среды, ее характеристики корректируются с учетом моментальной картины когнитивной активности пользователя.

Сбор нейрофизиологических входных данных осуществляется с помощью аппаратного нейроинтерфейса BrainBit (фирма "Нейротех", Россия) с программным обеспечением EEG Waves (далее BrainBit EEG Waves), который выполняет непрерывную потоковую регистрацию мозговых электрических потенциалов в онлайн-режиме. Подробные технические спецификации и описание принципов функционирования содержатся в официальных документах производителя [16].

На рис. 2 представлена структурная схема интеллектуальной системы управления освещенностью. Архитектурно система разделена на связанные между собой модули, которые обмениваются данными через внутреннюю беспроводную инфраструктуру на базе протокола Wi-Fi.

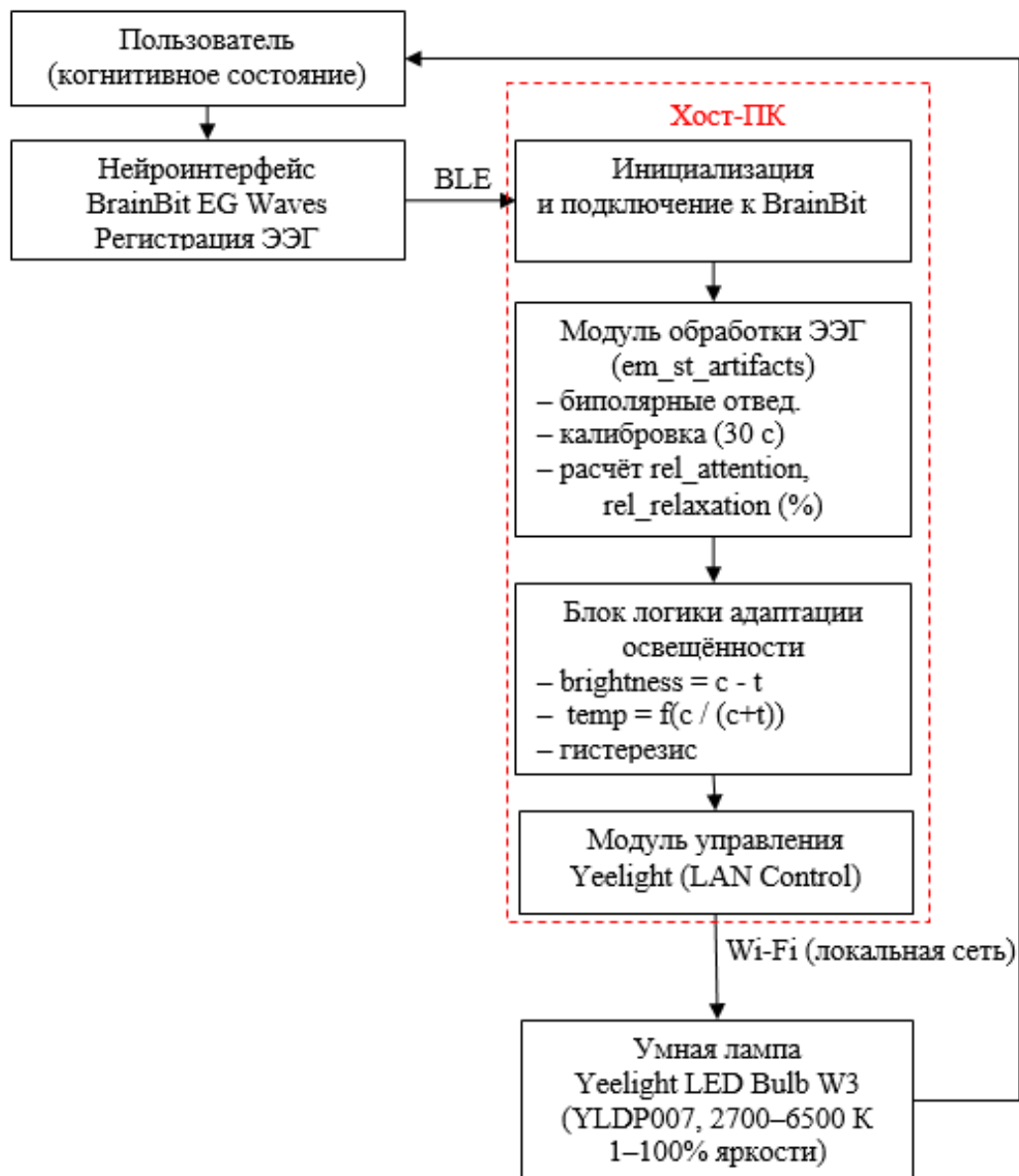


Рис. 2. Структурная схема интеллектуальной системы управления освещенностью.

Структурная схема содержит модуль регистрации ЭЭГ-сигналов, программный модуль обработки данных, включая блок принятия решений и исполнительное устройство.

Передача измерительных данных организована по стандарту BLE – энергоэффективной модификации Bluetooth; это обеспечивает ровный поток отсчетов при частоте выборки 250 Гц. Роль источника электроэнцефалографической

информации выполняет нейроинтерфейс BrainBit EEG Waves. Благодаря применению сухих контактных элементов и миниатюрному корпусу устройство не нуждается в длительной подготовке и надевается самим пользователем всего за несколько секунд, что делает его пригодным для ежедневного использования в домашних или офисных условиях [14].

На этапе обработки выполняются фильтрация сигналов, подавление артефактов и спектральный анализ с целью вычисления нормализованных показателей концентрации внимания и уровня расслабления [4, 13].

Основной обработкой занимается библиотека `em_st_artifacts`, специально разработанная для системы BrainBit EEG Waves [7, 15]. Перечислим ее ключевые особенности:

- поддержка биполярных отведений (T3–O1, T4–O2) – уменьшает влияние артефактов движения;
- встроенная автоматическая калибровка – собирает «норму» за первые 20–30 с;
- выдача нормализованных показателей `rel_attention` и `rel_relaxation` в процентах.

Логика управления включает непрерывную плавную интерполяцию параметров освещения на основе соотношения уровней внимания (`rel_attention`) и расслабления (`rel_relaxation`), получаемых от библиотеки `em_st_artifacts`.

Система вычисляет нормализованную разность $d \in [-1, 1]$:

$$d = \frac{\text{rel_attention} - \text{rel_relaxation}}{100},$$

где численное значение разности $d = -1$ соответствует глубокому расслаблению, а $d = +1$ – максимальной концентрации. На основе этого значения линейно интерполируются:

- яркость: от 10% (при $d = -1$) до 100% (при $d = +1$);
- цветовая температура: от 2700 К (теплый) до 6500 К (холодный).

Такой подход позволяет создавать естественный, динамический световой фон, который плавно реагирует на малейшие изменения когнитивного состояния, избегая резких скачков и дискомфорта.

В качестве исполнительного модуля системы выбрана светодиодная лампа

модели W3 от Yeelight; ее контроль реализован локально, посредством протокола LAN Control. Минимизация времени отклика и предотвращение передачи персональных данных в сторонние облачные сервисы достигаются за счет применения локального режима управления [16].

Ключевым архитектурным решением стал отказ от облачных зависимостей в пользу полностью локальной коммуникации. Такая схема исключает необходимость участия облачных платформ, учетной записи Mi-Home или промежуточных шлюзов сторонних производителей, поэтому управляющие команды поступают на прибор с задержкой ниже 50 мс.

Система работает на одном ПК, обрабатывает ЭЭГ через специализированную библиотеку `em_st_artifacts` (с поддержкой биполярной обработки и автоматической калибровки), а управление лампой осуществляется напрямую по открытому протоколу Yeelight LAN Control с использованием легковесной библиотеки `python-yeelight` [16].

Все взаимодействия модулей ограничены рамками локального сетевого сегмента. Записи ЭЭГ физически сохраняются на вычислительном узле, здесь они считываются, локально анализируются и интерпретируются, затем полученные результаты напрямую переводятся в команды управления освещением. В результате исключается отправка чувствительной нейрофизиологической информации во внешнюю сеть, что обеспечивает высокий уровень конфиденциальности и соответствие этическим стандартам в области нейротехнологий [18]. Кроме того, отсутствие зависимости от внешних API и облачной инфраструктуры делает систему устойчивой к сбоям в работе Интернета, обновлениям стороннего программного обеспечения или изменениям в политике производителей умных устройств. В результате пользователь получает надежную, приватную и отзывчивую систему, способную ненавязчиво адаптировать световую среду под его внутреннее состояние в реальном времени.

АЛГОРИТМ АДАПТАЦИИ ОСВЕЩЕННОСТИ

Система управления освещением базируется на постоянном мониторинге когнитивных параметров оператора и выполняет синтез управляющих сигналов, адаптируя их к актуальному функциональному статусу. Алгоритм адаптации освещенности может быть представлен в виде последовательности ряда шагов.

Шаг 1. Начало работы алгоритма.

Шаг 2. Выбор временного интервала $t = 0$.

Шаг 3. Загрузка нормализованных значений индексов концентрации внимания и расслабления, вычисленных на основе спектральных характеристик ЭЭГ-сигнала.

Шаг 4. Если индекс концентрации внимания (численное значение разности d) переходит установленный порог, система управления усиливает освещение и переводит цветовой тон в более прохладную гамму, в результате сохраняется высокая умственная работоспособность. Иначе, если доминируют индикаторы расслабленности, управляющая логика снижает интенсивность свечения и формирует теплые цветовые оттенки, обеспечивая атмосферу, способствующую восстановлению.

Шаг 5. Временной интервал t завершен?

Шаг 6. Если – да, то переход к шагу 7, иначе – переход к шагу 4.

Шаг 7. $t = t + 1$.

Шаг 8. $t = \max$?

Шаг 9. Если – да, то переход к шагу 10, иначе – переход к шагу 3.

Шаг 9. Окончание работы алгоритма.

Чтобы исключить резкие скачки интенсивности освещения, применяют прием постепенной аппроксимации команд управления. Сохранение стабильного функционирования и уменьшение вероятности того, что человек, взаимодействующий с системой, ощутит дискомфорт, являются прямым следствием использования этой техники. Аналогичные подходы адаптивного регулирования интегрированы во многих нейроадаптационных решениях, обеспечивающих взаимодействие человека с машиной [5, 14].

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ В ИНЖЕНЕРНОМ ОБРАЗОВАНИИ

Разработанная интеллектуальная система управления освещенностью может быть использована в учебных аудиториях, компьютерных классах и лабораториях инженерных специальностей. В процессе выполнения расчетных и проектных заданий система обеспечит автоматическую адаптацию световой среды в зависимости от когнитивного состояния обучающегося.

Исследования показали, что внедрение освещения, адаптирующегося к нейросигналам пользователя, снижает проявления усталости при продолжительной работе на персональном компьютере и повышает способность длительно удерживать внимание [17].

Параллельно интеграция подобных решений в учебную практику предоставит обучающимся практический опыт взаимодействия с интеллектуально ориентированными ИТ-системами в соответствии с современными требованиями к подготовке инженерных кадров в условиях цифровой трансформации экономики.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Пилотные испытания разработанной системы были проведены в компьютерном классе кафедры вычислительной техники Института компьютерных технологий и информационной безопасности Южного федерального университета. Эксперимент был организован во время выполнения лабораторных и расчетно-графических работ, в таких условиях студенты сталкиваются с задачами, требующими устойчивой концентрации внимания.

В исследовании приняли участие 12 добровольцев (студенты магистратуры направления 09.04.01 «Информатика и вычислительная техника»). Участники выполняли типичные для их учебной программы задания: решение алгоритмических задач на языке Python; анализ ЭЭГ-сигналов в среде MATLAB; разработка пользовательских интерфейсов и отладка программного кода.

Все сессии проходили индивидуально за персональными компьютерами при стандартных условиях освещенности помещения (без естественного света, базовое общее освещение было отключено). Адаптивная система управляла умной лампой Yeelight W3, расположенной на рабочем столе пользователя. Такая организация позволила изолировать эффект нейроадаптивного управления и исключить влияние внешних световых факторов.

В качестве оценочных показателей регистрировались точность выявления состояний когнитивной активности, латентность отклика системы и личные субъективные рейтинги комфортности.

Анализ полученных данных выявил, что доля корректных распознаваний режимов «фокус внимания» и «расслабленное состояние» превысила 85%.

Среднее время задержки реакции системы составило 420 мс. Это критически важно для обеспечения плавной и ненавязчивой адаптации световой среды, не отвлекающей пользователя и не вызывающей дискомфорта из-за резких или запаздывающих изменений.

В режиме автоматической адаптации были зафиксированы снижение субъективной утомляемости на 33% и повышение самооценки концентрации на 30% по сравнению с фиксированным освещением. При этом 92% участников эксперимента оценили реакцию света как естественную и соответствующую их внутреннему состоянию.

Переход на адаптивную схему подсветки вызвал сокращение субъективного ощущения усталости у пользователей и способствовал более положительной оценке рабочих условий в отличие от фиксированных сценариев освещения [14, 17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен новый подход к разработке интеллектуальной системы управления освещенностью рабочего пространства с учетом когнитивных особенностей пользователя.

Создан практически применимый, полностью автономный, локальный и приватный контур нейроадаптивной обратной связи «мозг → свет → мозг» (без зависимости от облачных сервисов), основанный на доступных потребительских устройствах.

В качестве источника нейроданных использован отечественный нейроинтерфейс BrainBit EEG Waves с четырьмя сухими электродами, расположенными по международной системе 10–20, что обеспечивает высокую достоверность регистрации альфа- и бета-ритмов.

В качестве исполнительного устройства выбрана умная лампа Yeelight LED Bulb W3 (модель YLDP007), поддерживающая широкий диапазон регулировки цветовой температуры (2700–6500 К) и яркости (1–100 %).

Проведенные эксперименты подтвердили эффективность предложенного решения. Точность распознавания ключевых состояний составила 86.2%, а типичное время отклика системы не превышает 0.5 с. По сравнению с ручным управлением, в автоматическом режиме субъективная утомляемость снизилась на

33%, а уровень концентрации повысился на 30%. Более 90% участников оценили реакцию света как естественную и соответствующую их внутреннему состоянию.

Работа демонстрирует практическую реализуемость нейроуправляемых систем на основе доступных потребительских устройств, а также их потенциал в повышении когнитивной эффективности и комфортности рабочей среды.

Полученные результаты открывают перспективы для дальнейшего применения подобных систем в образовании, удаленной работе, wellness-средах и немедикаментозной поддержке когнитивного здоровья.

Благодарности

Выражаем искреннюю благодарность компании «Нейротех» (г. Таганрог), в том числе директору компании В. Л. Сахарову и сотруднику Д. М. Алексееву. Деятельность компании направлена на разработку и внедрение в здравоохранение портативных, надежных и доступных систем для электрофизиологических исследований. Благодаря поддержке компании «Нейротех» стало возможным реализовать практическую часть исследования и продемонстрировать работоспособность разработанной интеллектуальной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Boyce P.R. Human Factors in Lighting. CRC Press. 2014. 667 p.
2. Knez I. Effects of colour of light on nonvisual psychological processes // Journal of Environmental Psychology. 2001. Vol. 21, No. 2. P. 201–208.
<https://doi.org/10.1006/jevp.2000.0198>
3. Münch M. et al. Blue-enriched morning light as a countermeasure to light at the wrong time: effects on cognition, sleepiness, sleep, and circadian phase // Neuropsychobiology. 2017. Vol. 74, No 4. P. 207–218.
<https://doi.org/10.1159/000477093>
4. Cohen M.X. Analyzing Neural Time Series Data. Theory and Practice. MIT Press. 2014. <https://doi.org/10.7551/mitpress/9609.001.0001>
5. Emotiv: EEG-Based Cognitive State Detection.
URL: <https://www.emotiv.com/> (дата обращения: 14.04.2026).
6. Кузьменко Ю.П., Софронов А.А., Кузьменко В.П. Использование гра-

фового подхода для описания алгоритмов интеллектуального управления освещением // Наука и бизнес: пути развития. 2021. №12 (126). С. 82–84.

7. Щербаков А.С. Адаптация методов вычисления глобального освещения на основе алгоритма излучательности к архитектуре кадрового графа // Вычислительные методы и программирование. 2025. № 26(2). С. 99–110.

<https://doi.org/10.26089/NumMet.v26r207>

8. Ereemeev A.P., Muntyan E.R. Developing an ontology on the basis of graphs with multiple and heterotypic connections // Scientific and Technical Information Processing. 2022. Vol. 49, No. 6. P. 427–438.

<https://doi.org/10.3103/s0147688222060041>

9. Мунтян Е.Р. Формирование цифрового портрета субъекта на основе парсинга сети для построения карьерной траектории // Информатизация и связь. 2023. №2. С. 36–41. <https://doi.org/10.34219/2078-8320-2023-14-2-36-41>

10. Зяблова Е.Р. Моделирование социальных взаимодействий на основе графовых подходов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2024. №6 (242). С. 131–142. <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2024-6-131-142>

11. Yu Ch., Huang X. Attention level monitoring based on EEG measurement // Applied and Computation Engineering. 2024. Vol. 38, No 1. P. 151–155.

<https://doi.org/10.54254/2755-2721/38/20230546>

12. Niedermeyer E., da Silva F.L. Electroencephalography: Basic Principles, Clinical Applications and Related Fields. 5th Edition. Lippincott Williams & Wilkins. 2005. 1309 p.

13. Иванов А.А. Обзор методов математического анализа ЭЭГ. Количественная ЭЭГ // Эпилепсия и пароксизмальные состояния. 2023. № 2 (15). С. 171–192. <https://doi.org/10.17749/2077-8333/epi.par.con.2023.154>

14. Дедков А.Е., Андриков Д.А., Храмов А.Е. Обзор способов измерения когнитивной нагрузки мозга и методов машинного обучения для их идентификации на основе данных ЭЭГ // Врач и информационные технологии. 2024. № 3. С. 20–31. https://doi.org/10.25881/18110193_2024_3_20

15. BrainBit EEG Waves: Technical Documentation.

URL: <https://mederia.ru/upload/iblock/e35/e35fe74dbbdea1e0a72a68bf17738c38.pdf> (дата обращения: 14.04.2026).

16. Yeelight Smart Bulb Control with mPython. URL: <https://github.com/labplus-cn/mpython-docs/blob/master/docs/en/tutorials/advance/iot/yeelight.rst> (дата обращения: 14.04.2026).

17. Кустикова Ю.О., Умрилов Р.Р., Румянцева А.С., Мусеева А.А. Влияние освещенности на создание комфортных условий труда // Строительство: наука и образование. 2024. Т. 14, Вып. 1. С. 149–158.
<http://doi.org/10.22227/2305-5502.2024.1.10>

18. Babiloni C. et al. Human cortical electroencephalography (EEG) rhythms during the observation of simple aimless movements: a high-resolution EEG study // Neuroimage. 2002. Vol. 17, No. 2. P. 559–572.
<http://doi.org/10.1006/nimg.2002.1192>

19. Зяблова Е.Р., Егорова К.А. Интеллектуальная система управления освещенностью на основе анализа когнитивных особенностей пользователя // Материалы VIII Международной научно-практической конференции «Информатизация инженерного образования». М.: Издательский дом МЭИ, 2026. С. 47–51.

DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT LIGHTING SYSTEM TAKING INTO ACCOUNT THE COGNITIVE CHARACTERISTICS OF THE USER

E. R. Zyablova ^[0000-0002-1321-883X]

Southern Federal University, Taganrog, Russia

ermuntyan@sfedu.ru

Abstract

The article considers an approach to the development of an intelligent control system for the illumination of a workspace that corrects the intensity of light based on the analysis of the user's cognitive state. Illumination adaptation is performed in real time using data from the BrainBit EEG Waves neurointerface for electroencephalography (EEG) registration. Based on the spectral analysis of the EEG, indicators of concentration and emotional relaxation are calculated, which are used as control parameters for a smart lamp. The Yeelight LED Bulb W3 has been selected as a smart

lamp. Lighting is controlled locally via LAN Control protocol without data transfer to cloud services. Experimental studies have confirmed the operability of the system, low reaction delay and increased subjective comfort of the user. The developed system can be used to increase the effectiveness of the educational process of students.

Keywords: *intelligent lighting, cognitive characteristics, electroencephalography, BrainBit EEG Waves neural interface, adaptive environment, smart home.*

REFERENCES

1. Boyce P.R. Human Factors in Lighting (3rd ed.). CRC Press. 2014. 667 p.
2. Knez I. Effects of colour of light on nonvisual psychological processes // Journal of Environmental Psychology. 2001. Vol. 21, No. 2. P. 201–208.
<https://doi.org/10.1006/jevp.2000.0198>
3. Münch M. et al. Blue-enriched morning light as a countermeasure to light at the wrong time: effects on cognition, sleepiness, sleep, and circadian phase // Neuropsychobiology. 2017. Vol. 74, No. 4. P. 207–218.
<https://doi.org/10.1159/000477093>
4. Cohen M.X. Analyzing Neural Time Series Data. Theory and Practice. MIT Press. 2014. <https://doi.org/10.7551/mitpress/9609.001.0001>
5. Emotiv: EEG-Based Cognitive State Detection.
URL: <https://www.emotiv.com/> (date accessed: 14.04.2026).
6. Kuzmenko Yu.P., Sofronov A.A., Kuzmenko V.P. Ispol'zovanie grafovogo podhoda dlya opisaniya algoritmov intellektual'nogo upravleniya osveshcheniem // Nauka i biznes: puti razvitiya. 2021. No. 12 (126). P. 82–84.
7. Shcherbakov A.S. Adaptaciya metodov vychisleniya global'nogo osveshcheniya na osnove algoritma izluchatel'nosti k arhitekture kadrovogo grafa // Vychislitel'nye metody i programmirovaniye. 2025. No. 26 (2). P. 99–110.
<https://doi.org/10.26089/NumMet.v26r207>
8. Ereemeev A.P., Muntyan E.R. Developing an ontology on the basis of graphs with multiple and heterotypic connections. Scientific and Technical Information Processing. 2022. Vol. 49, No. 6, P. 427–438.
<https://doi.org/10.3103/s0147688222060041>
9. Muntyan E.R. Formirovaniye cifrovogo portreta sub"ekta na osnove

parsinga seti dlya postroeniya kar'ernoj traektorii // Informatizaciya i svyaz'. 2023. No. 2. P. 36–41. <https://doi.org/10.34219/2078-8320-2023-14-2-36-41>

10. *Zyablova E.R.* Modelirovanie social'nyh vzaimodejstvij na osnove grafovych podhodov // Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki. 2024. No. 6 (242). P. 131–142. <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2024-6-131-142>

11. *Yu Ch., Huang X.* Attention level monitoring based on EEG measurement // Applied and Computation Engineering. 2024. Vol. 38, No 1. P. 151–155. <https://doi.org/10.54254/2755-2721/38/20230546>

12. *Niedermeyer E., da Silva F.L.* Electroencephalography: Basic Principles, Clinical Applications and Related Fields. 5th Edition. Lippincott Williams & Wilkins. 2005. 1309 p.

13. *Ivanov A.A.* Obzor metodov matematicheskogo analiza EEG. Kolichestvennaya EEG // Epilepsiya i paroksizmal'nye sostoyaniya. 2023. No. 2 (15). P. 171–192. <https://doi.org/10.17749/2077-8333/epi.par.con.2023.154>

14. *Dedkov A.E., Andrikov D.A., Khramov A.E.* Obzor sposobov izmere-niya kognitivnoj nagruzki mozga i metodov mashinnogo obucheniya dlya ih iden-tifikacii na osnove dannyh EEG // Vrach i informacionnye tekhnologii. 2024. No. 3. P. 20–31. https://doi.org/10.25881/18110193_2024_3_20

15. BrainBit EEG Waves: Technical Documentation. URL: <https://mederia.ru/upload/iblock/e35/e35fe74dbbdea1e0a72a68bf17738c38.pdf> (date accessed: 14.04.2026).

16. Yeelight Smart Bulb Control with mPython. URL: <https://github.com/labplus-cn/mpython-docs/blob/master/docs/en/tutorials/advance/iot/yeelight.rst> (date accessed: 14.04.2026).

17. *Kustikova Yu.O., Umrilov R.R., Rumyantseva A.S., Moiseeva A.A.* Vliyanie osveshchennosti na sozdanie komfortnyh uslovij truda // Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie. 2024. Vol. 14, No. 1. P. 149–158. <http://doi.org/10.22227/2305-5502.2024.1.10>

18. *Babiloni C. et al.* Human cortical electroencephalography (EEG) rhythms during the observation of simple aimless movements: a high-resolution EEG study // Neuroimage. 2002. Vol. 17, No. 2. P. 559–572. <http://doi.org/10.1006/nimg.2002.1192>

19. Zyablova E.R., Egorova K.A. Intel'ktual'naya sistema upravleniya osveshchennost'yu na osnove analiza ko-gnitivnykh osobennostej pol'zovatelya // Materialy VIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Informatizaciya inzhernogo obrazova-niya». M.: Izdatel'skij dom MEI, 2026. S. 47–51.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ



ЗЯБЛОВА Евгения Ростиславна – доцент кафедры вычислительной техники Южного федерального университета, член Российской ассоциации искусственного интеллекта, к.т.н. Область научных интересов: информатизация образования, искусственный интеллект, интеллектуальный анализ данных, нечеткие системы.

Evgenia Rostislavna ZYABLOVA – associate professor of the Department at Computer Engineering, Southern Federal University, member of the Russian Association of Artificial Intelligence, Ph.D. Research interests: informatization of education, artificial intelligence, data mining, fuzzy systems.

email: ermuntyan@sfedu.ru

ORCID: 0000-0002-1321-883X

Материал поступил в редакцию 29 мая 2026 года

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ПРОГРАММ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ В ОБЛАСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ НА БАЗЕ СРЕДЫ SIMINTECH

Я. Р. Саввин¹ [0009-0003-6920-9283], Д. В. Вершинин² [0009-0006-2603-8914]

^{1, 2} *Национальный исследовательский институт «МЭИ», г. Москва, Россия*

¹savvinyr@mpei.ru, ²vershinindv@mpei.ru

Аннотация

Изучены возможности среды имитационного моделирования SimInTech для создания программного комплекса, пригодного для выявления зависимостей между параметрами системы автоматического управления (САУ) и показателями качества ее работы. Рассмотрены инструменты выбранной среды, на основе которых разработана совокупность образовательных моделей. Показаны результаты работы созданного учебного комплекса на примере решения задачи коррекции линейной непрерывной системы автоматического управления с отрицательной обратной связью при использовании пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД)-регулятора, входящего в САУ последовательно, задачи адаптивного управления линейной непрерывной системы с явно заданной эталонной моделью и задачи многомерного сканирования с целью выяснения закономерностей выбранной системы.

Ключевые слова: *система автоматического управления, ПИД-регулятор, линейная непрерывная система, автоматизация, среда имитационного моделирования SimInTech.*

ВВЕДЕНИЕ

Автоматизация – это процесс внедрения технических и программных средств в производство с целью замены ручного человеческого труда на автоматические или автоматизированные системы управления. В настоящее время пользу автоматизации трудно переоценить, так как исключение человеческого фактора в рутинных задачах способствует повышению эффективности работы, понижению числа ошибок и сокращению несчастных случаев на производстве.

В свою очередь сотрудники освобождаются от выполнения однотипных действий и могут сосредоточиться на более сложных задачах, требующих креативного подхода и большого количества времени на свое решение.

В связи с ростом потребностей автоматизации производственных процессов в промышленности, как следствие, повысился и спрос на специалистов в данной области. Постоянно увеличивающаяся потребность в инженерах по автоматизации ставит вопрос о подготовке таких специалистов для рынка труда.

Системы имитационного моделирования являются мощным инструментом в области автоматизации технических процессов. Они позволяют создавать и анализировать модели как простых, так и сложных физических объектов. Их использование в процессе обучения студентов позволит будущим специалистам получить практический опыт работы с системами автоматического управления и изучить принципы их анализа и синтеза.

В настоящей работе представлены результаты использования системы динамического моделирования SimInTech. Эта программа является отечественным аналогом среды Matlab/Simulink. Благодаря свободному распространению SimInTech выбранную систему можно использовать в учебных лабораториях.

ТИПОВЫЕ ЗВЕНЬЯ СРЕДЫ SimInTech

Simintech является модульным программным обеспечением, в состав которого входят несколько математических ядер, база данных, графическая среда разработки, кодогенераторы и другие модули. Наиболее распространенные операторы и функции представлены в виде блоков, входящих в ту или иную библиотеку блоков. Рассмотрим некоторые из них.

1. *Источники, имитирующие различные типовые воздействия на систему.* У данного вида блоков отсутствует входной сигнал, поэтому нет портов входа. Перечислим источники, которые используются в настоящей работе.

1.1. Часы, представленные на рис. 1.а. Они формируют на выходе сигнал текущего модельного времени выполняемой задачи согласно формуле

$$y(t) = t,$$

где $y(t)$ – выходной скалярный сигнал, единицы измерения – секунды.

1.2. Ступенчатый сигнал, приведенный на рис. 1.б. Этот блок формирует значение на выходе, согласно формуле

$$y(t) = \begin{cases} y_0 & \text{при } t \leq t_0, \\ y_1 & \text{при } t > t_0, \end{cases}$$

где t_0 – время срабатывания, y_0 – начальное значение, y_1 – конечное значение, t – текущее модельное время в секундах.

1.3. Постоянный сигнал, указанный на рис. 1.в. Этот блок формирует выходной сигнал в соответствии с формулой

$$y(t) = y_0,$$

где y_0 – заданное значение, t – текущее модельное время в секундах.

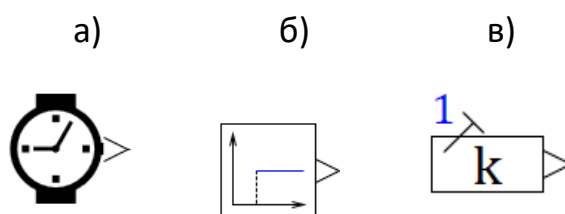


Рис. 1. а) Часы, б) Ступенчатый сигнал, в) Постоянный сигнал.

Среди источников также имеются реализации других видов сигналов (линейный, синусоидальный и т. д.), но они не используются в настоящей работе.

2. *Операторы, отвечающие за выполнение в процессе моделирования самых простых математических действий с сигналами.* Выделим наиболее используемые операторы.

2.1. Сумматор, изображенный на рис. 2.а. Блок является векторным и реализует поэлементное алгебраическое сложение входных сигналов с учетом их весовых коэффициентов

$$y(t) = a_1 u_1(t) + a_2 u_2(t) + \dots + a_n u_n(t),$$

где $y(t)$ – выходной сигнал блока; $u_1(t)$, $u_2(t)$, ..., $u_n(t)$ – входные сигналы; a_1 , a_2 , ..., a_n – весовые коэффициенты для каждого входного сигнала блока.

2.2. Сравнивающее устройство, приведенное на рис. 2.б. Блок является векторным и выполняет поэлементное вычитание второго входного сигнала из первого:

$$y(t) = u_1(t) - u_2(t),$$

где $y(t)$ – выходной сигнал блока; $u_1(t), u_2(t)$ – входные сигналы.

2.3. Усилитель, изображенный на рис. 2.в. Блок отвечает за умножение/усиление входной величины на заданный коэффициент k , согласно формуле (если входной сигнал является скалярным)

$$y(t) = ku(t),$$

или поэлементное умножение входного векторного сигнала на заданный коэффициент усиления k :

$$y_i(t) = ku_i(t), \quad i = 1, \dots, n,$$

где $u_i(t)$ – i -й элемент входного векторного сигнала $u(t)$, $y_i(t)$ – элемент выходного векторного сигнала $y(t)$, n – размерность входа и выхода.

2.4. Абсолютное значение, которое указано на рис. 2.г. Блок выполняет вычисление модуля входной величины. Для скалярного сигнала

$$y(t) = |u(t)|,$$

где $u(t), y(t)$ – входной и выходной сигналы.

Для векторного входного сигнала

$$y_i(t) = |u_i(t)|, \quad i = 1, \dots, n \geq 2,$$

где $u_i(t)$ – i -е элементы входного векторного сигнала, $y_i(t)$ – i -е элементы выходного векторного сигнала.

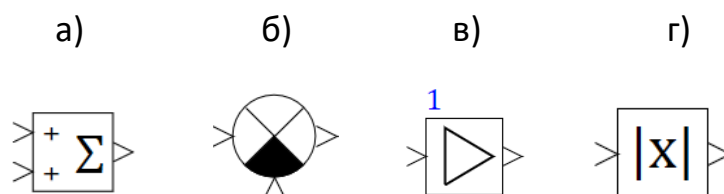


Рис. 2. а) Сумматор, б) Сравнивающее устройство, в) Усилитель, г) Абсолютное значение.

3. *Динамические блоки.* Вкладка содержит в себе типовые блоки, динамику которых можно описать линейными обыкновенными дифференциальными уравнениями. Укажем наиболее используемые динамические блоки.

3.1. Инерционное звено 1 порядка, указано на рис. 3.а. Блок является векторным и реализует математическую модель звена, описанную формулой (при выполнении нулевых предначальных условий)

$$W(p) = \frac{k}{Tp + 1},$$

где k – коэффициент усиления системы, T – постоянная времени, p – переменная Лапласа.

3.2. Передаточная функция общего вида, изображена на рис. 3.б. Блок отвечает за реализацию математической модели звена, описанной формулой (при выполнении нулевых начальных условий)

$$W(p) = \frac{b_m p^m + \dots + b_2 p^2 + b_1 p + b_0}{a_n p^n + \dots + a_2 p^2 + a_1 p + a_0},$$

где a_i, b_j – коэффициенты ($i = 0, \dots, n, j = 0, \dots, m, n \geq m$);

3.3. Блок языка программирования, приведен на рис. 3.в. Этот блок предназначен для создания пользовательских блоков, выполняющих нетривиальные операции. Пользователь может на встроенном языке программирования реализовывать произвольные алгоритмы работы системы.

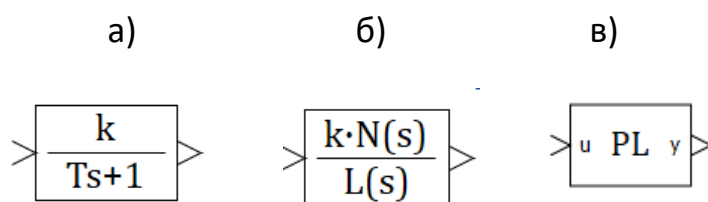


Рис. 3. а) Инерционное звено 1 порядка, б) Передаточная функция общего вида, в) Блок «Язык программирования».

4. *Дискретные блоки.* Динамика блоков данной вкладки описывается с помощью дискретных передаточных функций и линейных разностных уравнений состояния. Использование блоков из данной вкладки необходимо для автомати-

ческого вычисления значений показателей качества. При достаточно высокой частоте квантования систему, содержащую дискретные блоки, можно считать непрерывной. Перечислим наиболее используемые дискретные блоки.

4.1. Запоздывание на период квантования (рис. 4.а). Блок реализует дискретное запоздывание входного сигнала на величину, равную одному периоду квантования:

$$y(t) = x(t[k - 1]),$$

где $y(t)$ – значение выходного сигнала в текущий момент расчетного (модельного) времени, $x(t[k - 1])$ – значение входного сигнала в предпоследний момент дискретизации $t[k - 1]$. Квантование происходит с периодом T , который задается параметром блока.

4.2. Дискретный ПИД-регулятор, изображен на рис. 4.б. В этом блоке реализована передаточная функция дискретного ПИД-регулятора:

$$W(z) = K_P + K_I \frac{Tz}{z - 1} + K_D \frac{z - 1}{Tz},$$

где K_P – пропорциональная составляющая, K_I – интегральная составляющая, K_D – дифференциальная составляющая, T – период квантования.

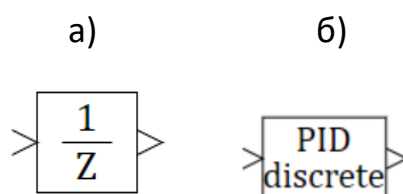


Рис. 4. а) Запоздывание на период квантования, б) Дискретный ПИД-регулятор.

5. *Сигналы.* Блоки данной вкладки обеспечивают обмен сигналами в процессе моделирования. Выделим наиболее часто используемые виды сигналов.

5.1. Чтение из списка сигналов (рис. 5.а). Блок производит считывание данных из локального списка сигналов/списка сигналов подключенной БД.

5.2. Запись в список сигналов, блок представлен на рис. 5.б. Производит запись данных в локальный список сигналов проекта/список сигналов подключенной БД.

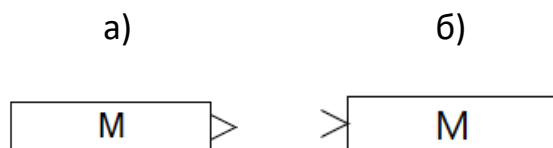


Рис. 5. а) Чтение из списка сигналов, б) Запись в список сигналов.

6. *Вывод данных.* Блоки данной вкладки отвечают за внешнее визуальное представление и запись данных модели в отдельные файлы. Приведем примеры блоков вывода данных.

6.1. Временной график, изображен на рис. 6.а. Блок позволяет отобразить текущие результаты моделирования в виде временных графиков одной или нескольких переменных.

6.2. Блок вывода данных в файл (рис. 6.б). Блок реализует запись данных в файл формата .txt. Каждая строка текстового файла выводится в виде: (время (величина 1) ... (величина n)).

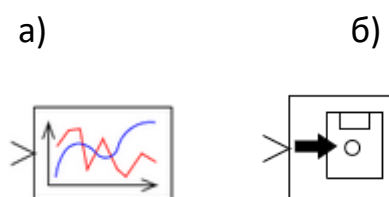


Рис. 6. а) Временной график, б) Блок вывода данных в файл.

БАЗА ДАННЫХ SIMINTECH

Для структурированного хранения сигналов и переменных в SimInTech есть возможность подключения внешней (относительно файлов проекта) базы данных (БД). Именно благодаря использованию БД можно реализовывать модели, которые в автоматическом режиме будут вычислять текущие показатели качества и выполнять на их основе коррекцию САУ. Внешний вид БД представлен на рис. 7.

Редактор базы данных сигналов: C:\Users\Ярослав\Desktop\Диплом\Диплом\База_данных_сигналов.db

Редактор Настройки Состояние сети

Группа Сводная

№	Категории	№	Группы сигналов	№	Имя	Название	Тип данных	Формула	Значение	Способ расчёта
1	CAU	1	IshodnieParametri	1	tust	Время регулирования	Веществен...		121	Переменная
		2	MetodCigleraNikolsa	2	ymax	Максимальное значение выходного ...	Веществен...		1.1372918	Переменная
		3	SimpleksMetod	3	yust	Установившееся значение выходно...	Веществен...		1.0013483	Переменная
		4	SimpleksMetod2	4	deltast	Статическая ошибка	Веществен...	abs(Isho...	0.0013483024	Переменная
		5	OblastResheniy	5	sigma	Перерегулирование	Веществен...	(Ishodnie...	13.576042	Переменная

Фильтр категорий: Все (*) Фильтр групп сигналов: Все (*) Фильтр имени сигналов: Все (*) Объединение: И Фильтр названия сигналов: Все (*)

OK

Рис. 7. База данных SimInTech.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ КОРРЕКЦИИ САУ

Структура исследуемой системы автоматического управления представлена на рис. 8. Использование замкнутой структуры САУ позволит производить компенсацию возмущающих воздействий для достижения требуемых значений показателей качества: устойчивости, точности, быстродействия и перерегулирования системы. Поведение объекта управления может быть описано динамическим звеном произвольного порядка, потому что исследование устойчивости системы управления будет проводиться по графику ее переходного процесса. Для примера в качестве объекта управления будем использовать звено 3-го порядка

$$W(p) = \frac{100}{(1 + p)(1 + 10p)(1 + 100p)},$$

так как в данном случае САУ может быть неустойчивой (запас по фазе в системе автоматического управления будет стремиться к -90°). Кроме того, в состав САУ добавим возмущающее воздействие, динамику которого можно описать инерционным звеном 1-го порядка

$$W(p) = \frac{1}{(1 + 0.5p)}.$$

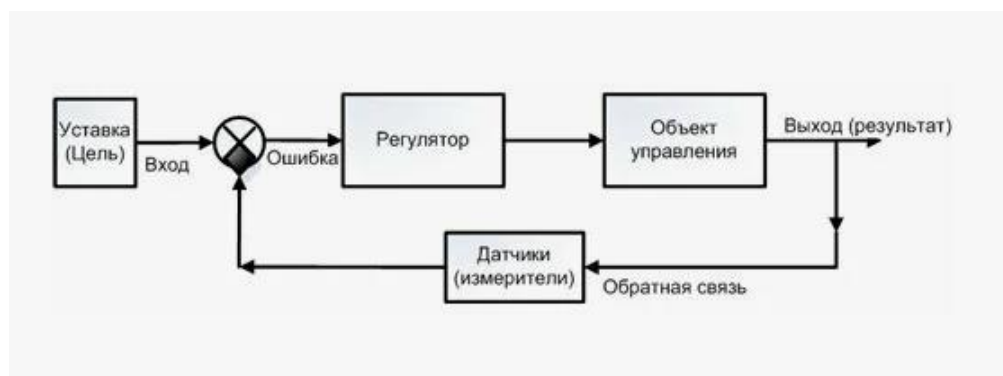


Рис. 8. Структура САУ.

В качестве регулятора будем использовать ПИД-регулятор из-за простоты его работы, причем его дискретную версию. Это позволит нам использовать дискретный блок задержки на один квант времени для определения времени регулирования САУ на основе текущей ошибки управления (рис.9). Если ошибка управления в какой-то момент времени будет меньше заданного порога (в данном случае 5%), то текущий момент будет зафиксирован и записан в БД. Если после фиксации времени регулирования ошибка вновь превысит указанный порог, то в БД будет записываться текущее модельное время. Такая проверка выполняется на протяжении всей работы системы управления.

Для определения численных значений показателей качества будем записывать в БД следующие показатели:

- 1) значение сигнала на выходе САУ, обозначенное как Y_u ;
- 2) время регулирования T_u , полученное в результате работы субструктуры «Расчет показателей качества» (рис. 9, верхняя часть);
- 3) максимальное значение переходного процесса САУ Y_m , полученное в результате работы субструктуры «Расчет показателей качества» (рис. 9, нижняя часть).

Статическую ошибку регулирования будем вычислять по формуле

$$D = |1 - Y_u|,$$

где D – значение статической ошибки регулирования, Y_u – установившееся значения выходного сигнала системы управления, а значение перерегулирования – по формуле

$$S = \frac{Y_m - Y_u}{Y_u} 100,$$

где S – перерегулирование системы управления, Y_m – максимальное значение выходного сигнала системы управления, Y_u – установившееся значение выходного сигнала системы управления. Реализованная схема моделирования показана на рис. 9– 11.

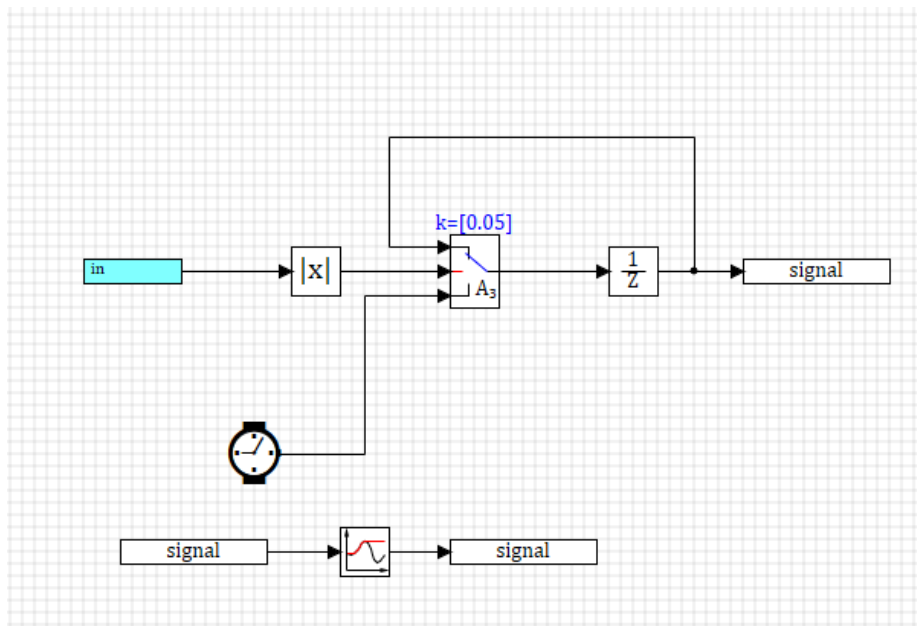


Рис. 9. Субструктура «Расчет показателей качества».

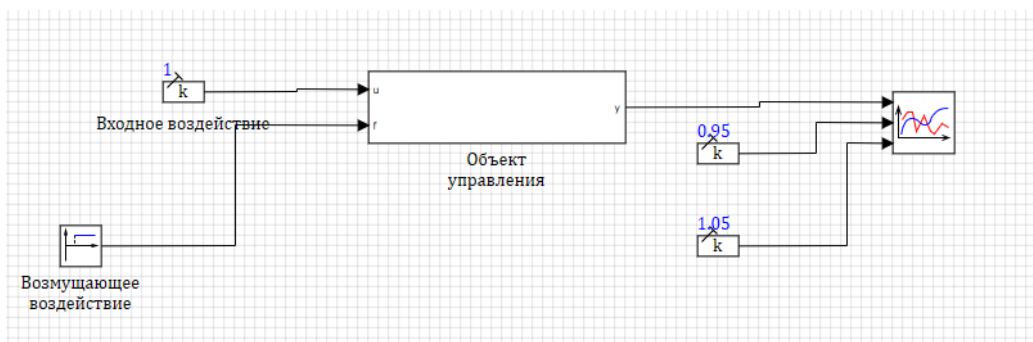


Рис. 10. Общий вид схемы моделирования.

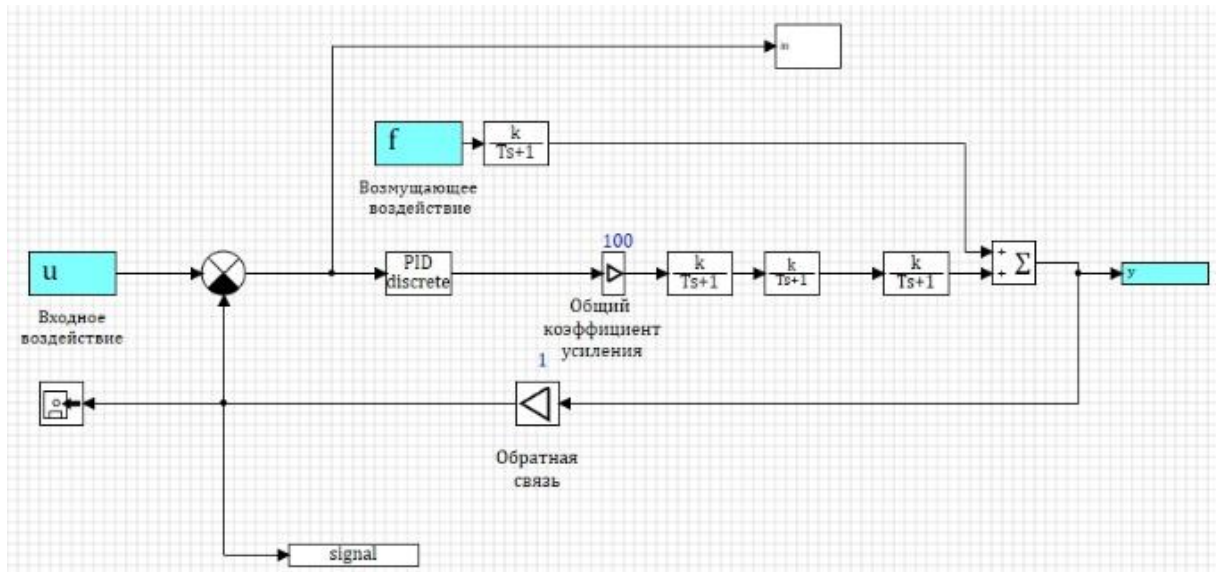


Рис. 11. Субструктура «Объект управления».

Результаты работы САУ до настройки ПИД-регулятора представлены на рис. 12 и 13. Можно заметить, что время работы САУ оставляет желать лучшего (121 с модельного времени), перерегулирование составляет 13.5%, а сам переходной процесс происходит с колебаниями, чего быть не должно. Проведем коррекцию системы управления.

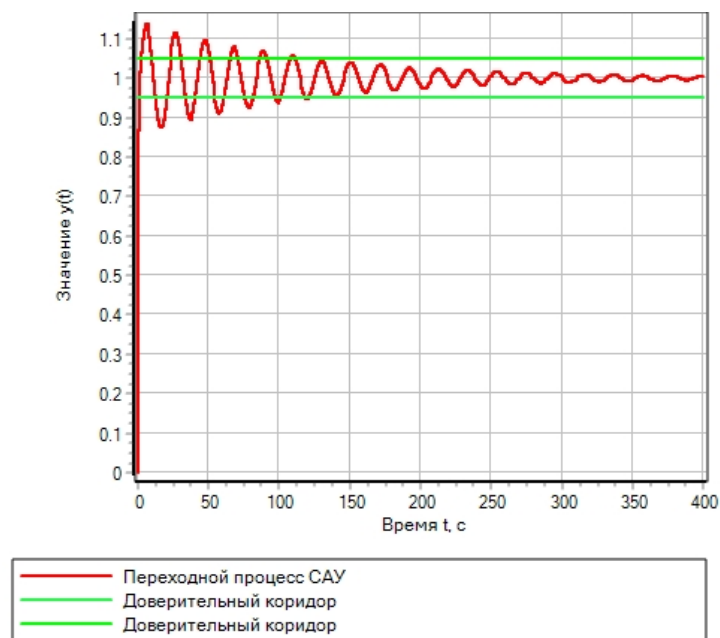


Рис. 12. График переходного процесса САУ до коррекции.

№	Имя	Название	Тип данных	Формула	Значение	Способ расчёта
1	tust	Время регулирования	Веществен...		121	Переменная
2	ymax	Максимальное значение выходного ...	Веществен...		1.1372918	Переменная
3	yust	Установившееся значение выходно...	Веществен...		1.0013483	Переменная
4	deltast	Статическая ошибка	Веществен...	abs(Isho...	0.0013483024	Переменная
5	sigma	Перерегулирование	Веществен...	(Ishodnie...	13.576042	Переменная

Рис. 13. Показатели качества САУ до коррекции.

Настройку регулятора будем проводить с помощью неточного метода Циглера – Никольса и последующей донастройкой с применением оптимизационных методов, в частности симплекс-метода. Неточная настройка позволит нам получить начальное приближение для дальнейшего применения симплекс-метода, который чувствителен к выбору начальной точки. Данный метод реализуем при помощи блока программирования среды SimInTech (рис. 14).

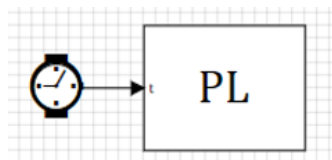


Рис. 14. Схема запуска алгоритма метода Циглера – Никольса.

Логика программы следующая: параметры регулятора в субструктуре «Объект управления» приравняются к 0, кроме пропорциональной составляющей K_p (она приравняется к 0.0001). После этого сохраняется текущее состояние САУ для последующего поиска предельного коэффициента усиления, при котором в САУ появляются незатухающие колебания, и периода таких колебаний. В течение моделирования производятся поиск времени, за которое происходит четверть первого полного колебания, и проверка устойчивости (амплитуда первого колебания должна быть не меньше амплитудных значений всех последующих колебаний). Такая проверка происходит на основе записываемых в БД переменных y_{ust} и y_{max} . Если получившийся процесс является устойчивым, то заново запускается моделирование работы САУ, но уже с увеличенным значением K_p на один шаг (например, на 1). Если работа САУ является неустойчивой, то происходит возврат на предыдущее значение K_p и уменьшение шага в 2 раза. Данный процесс повторяется, пока значение шага больше заданного порога, например, 0.001. При этом в системе не должно быть расходящихся колебаний.

В результате работы алгоритма мы получаем значение предельного коэффициента усиления и период незатухающих колебаний для первоначальной настройки по методу Циглера – Никольса.

Результаты неточной настройки САУ представлены на рис. 15 и 16. Видно, что быстродействие системы увеличилось почти в 3 раза (время регулирования составляет 47 с), но перерегулирование увеличилось почти до 32%. Проведем донастройку регулятора при помощи встроенного в среду блока оптимизации.

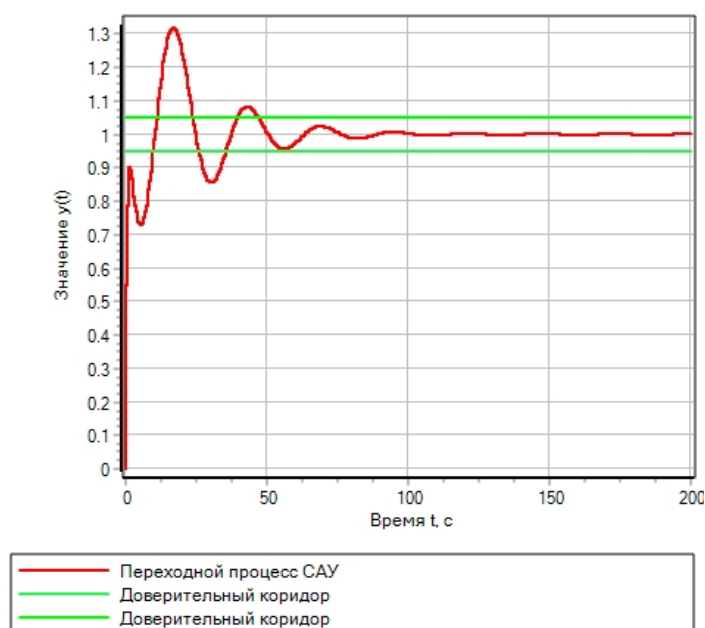


Рис. 15. График переходного процесса САУ после неточной настройки.

№	Имя	Название	Тип данных	Формула	Значение	Способ расчёта
1	tust1	Время регулирования	Веществен...		47	Переменная
2	y _{max} 1	Максимальное значение выходного ...	Веществен...		1.3187074	Переменная
3	y _{ust} 1	Установившееся значение выходно...	Веществен...		1	Переменная
4	deltast1	Статическая ошибка	Веществен...	abs(Meto...	0	Переменная
5	sigma1	Перерегулирование	Веществен...	(MetodCi...	31.870738	Переменная
6	kp1	Пропорциональный коэффициент П...	Веществен...	MetodCig...	0.73248187	Переменная
7	ki1	Интегральный коэффициент ПИД-р...	Веществен...	MetodCig...	0.077519513	Переменная
8	kd1	Дифференциальный коэффициент ...	Веществен...	MetodCig...	1.7303053	Переменная
9	kp _{pred}	Предельное значение kp1 для мето...	Веществен...		1.2208031	Переменная
10	T _{koleb}	Период незатухающих колебаний	Веществен...		18.898	Переменная
11	Neust	Флаг для выявления неустойчивост...	Веществен...		0	Переменная

Рис. 16. Показатели качества САУ после неточной настройки.

Схема моделирования для донастройки регулятора приведена на рис. 17. Главным отличием этой схемы является добавление блока оптимизации. На вход данного блока подаются значения текущих показателей качества (время регулирования и перерегулирования), на выход – значения параметров регулятора, которые необходимо подобрать. Завершение работы схемы происходит в трех случаях:

- 1) настройка регулятора завершена, так как показатели качества удовлетворяют ограничениям (ограничения задаются в виде интервала допустимых значений);
- 2) настройка регулятора не завершена, так как достигнуто максимальное число построений переходного процесса (данное пороговое значение задается, изначально оно равно 300);
- 3) настройка регулятора не завершена, так как переходной процесс не завершился (нужно увеличить конечное время моделирования в настройках среды).

Помимо настройки ПИД-регулятора происходит сохранение значений его параметров и показателей качества САУ для дальнейшей обработки.

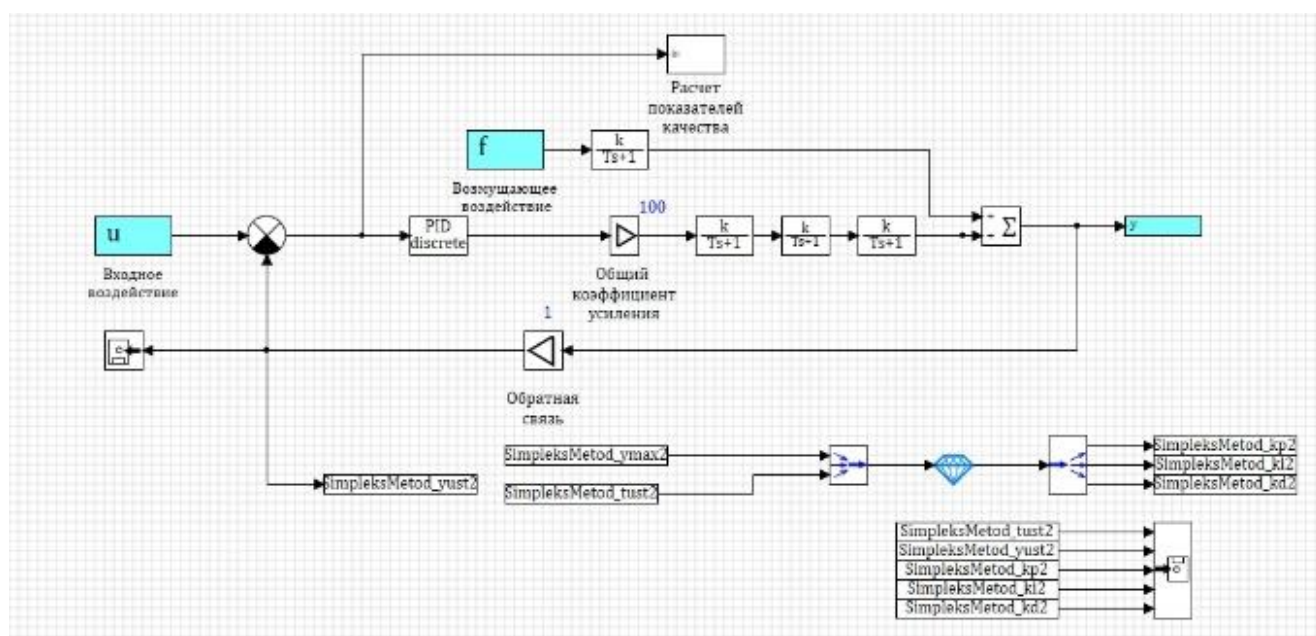


Рис. 17. Схема моделирования с использованием блока оптимизации.

Результаты настройки САУ приведены на рис. 18 и 19. Как можно заметить, быстродействие САУ после донастройки увеличилось в 121 раз по сравнению с системой управления без коррекции, перерегулирование при этом меньше 1%.

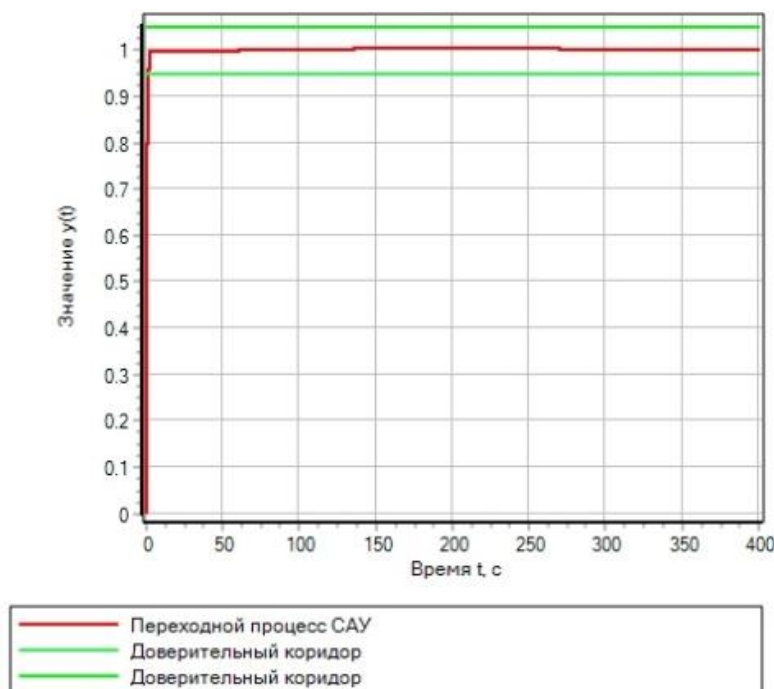


Рис. 18. График переходного процесса САУ после коррекции.

№	Имя	Название	Тип данных	Формула	Значение	Способ расчёта
1	tust2	Время регулирования	Веществен...		1	Переменная
2	ymax2	Максимальное значение выходного ...	Веществен...		1.0035995	Переменная
3	yust2	Установившееся значение выходно...	Веществен...		1.0003562	Переменная
4	deltast2	Статическая ошибка	Веществен...	$\text{abs}(\text{Simp}...$	0.00035617837	Переменная
5	sigma2	Перерегулирование	Веществен...	$(\text{Simplek}...$	0.32421473	Переменная
6	kp2	Пропорциональный коэффициент П...	Веществен...		0.0001	Переменная
7	ki2	Интегральный коэффициент ПИД-р...	Веществен...		0.0001	Переменная
8	kd2	Дифференциальный коэффициент ...	Веществен...		0.0001	Переменная

Рис. 19. Показатели качества САУ после коррекции.

Применение метода неточной настройки Циглера – Никольса справедливо для систем, которые могут быть неустойчивыми. Однако этот программный комплекс можно применять и для систем 2-го порядка и ниже. В таком случае выбирать начальное приближение для блока оптимизации придется вручную. Кроме того, неустойчивость исходной САУ также не является ограничением применения разработанного алгоритма. Приведем результаты коррекции неустойчивой системы управления. В качестве объекта управления возьмем динамическое

звено 4-го порядка

$$W(p) = \frac{50}{(1+p)(1+10p)(1+100p)(1+150p)}.$$

Результаты работы САУ до и после коррекции приведены на рис. 20–22.

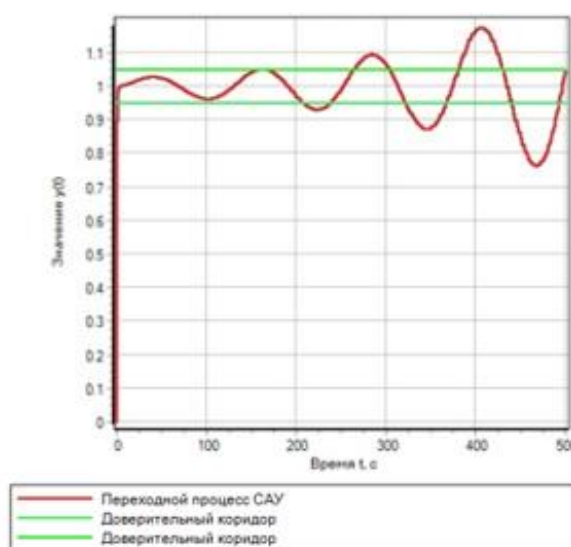


Рис. 20. График переходного процесса САУ до коррекции.

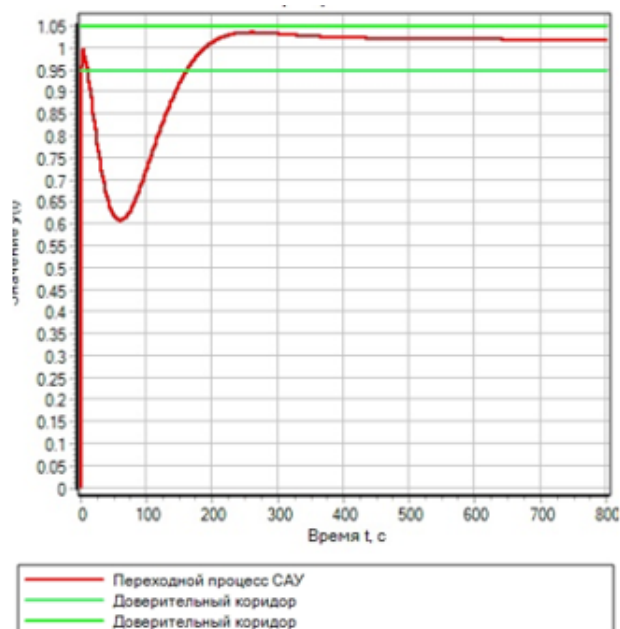


Рис. 21. График переходного процесса СА после коррекции.

№	Имя	Название	Тип данных	Формула	Значение	Способ расчета
1	tust2	Время регулирования	Веществен...		161	Переменная
2	ymax2	Максимальное значение выходного ...	Веществен...		1.0357583	Переменная
3	yust2	Установившееся значение выходно...	Веществен...		1.017726	Переменная
4	deltast2	Статическая ошибка	Веществен...	abs(Simp...	0.017726027	Переменная
5	sigma2	Перерегулирование	Веществен...	(Simplek...	1.7718246	Переменная
6	kp2	Пропорциональный коэффициент П...	Веществен...		0.12352461	Переменная
7	ki2	Интегральный коэффициент ПИД-р...	Веществен...		0.0001	Переменная
8	kd2	Дифференциальный коэффициент ...	Веществен...		5.5527629	Переменная

Рис. 22. Показатели качества САУ после коррекции.

На рис. 20–22 видно, что до коррекции САУ была неустойчива, а ее переходной процесс представляет собой расходящиеся колебания. После коррекции время регулирования системы управления составило 161 с модельного времени, а перерегулирование равняется почти 2%. Таким образом, неустойчивость САУ не является препятствием к применению реализованного ранее алгоритма настройки ПИД-регулятора.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ САУ

Структура исследуемой системы автоматического управления представлена на рис. 23. Из-за воздействия окружающей среды на систему автоматического управления или с течением времени эксплуатации параметры объекта управления могут изменяться, а такие показатели качества, как точность работы системы, время регулирования и перерегулирование, могут ухудшиться. Исходная САУ представлена на рис. 23.

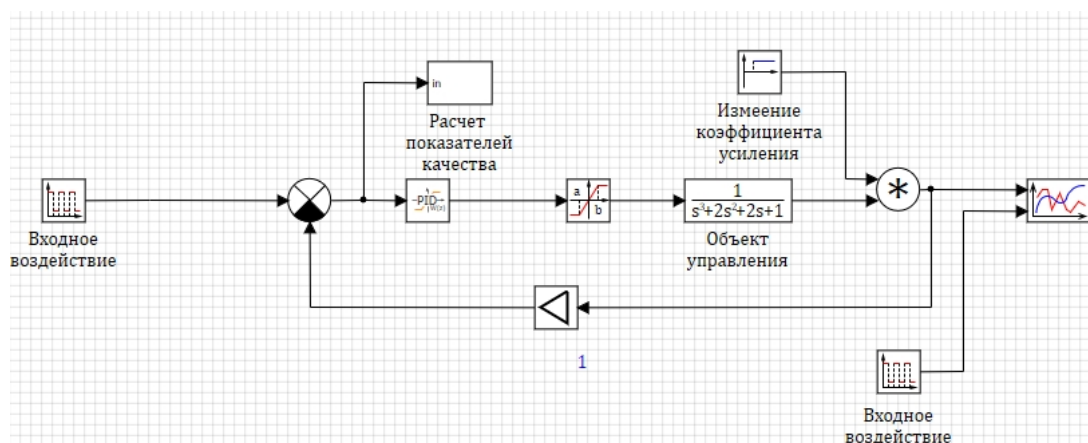


Рис. 23. Схема исходной САУ без механизма адаптации.

Пусть динамика объекта управления будет описываться динамическим звеном 3-го порядка

$$W(p) = \frac{1}{p^3 + 2p^3 + 2p + 1}.$$

Параметры ПИД-регулятора: $K_P = 1$, $K_I = 0.2$, $K_D = 1$. Пусть в момент времени $t = 210$ происходит увеличение коэффициента усиления системы в 20 раз. Переходной процесс исходной САУ представлен на рис. 34.

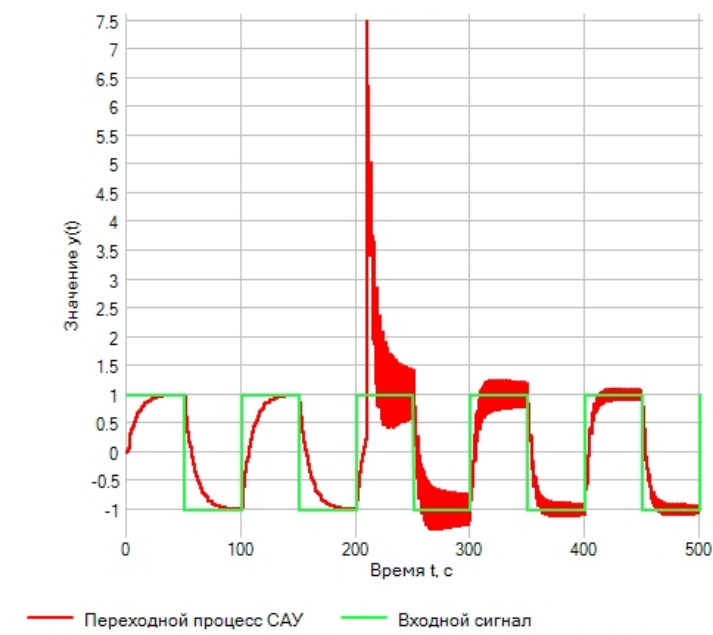


Рис. 24. Переходной процесс исходной САУ.

Как видно на рис. 24, после изменения коэффициента усиления в системе на выходе появились высокочастотные колебания. Со временем их амплитуда уменьшается, но происходит это довольно медленно. Попробуем использовать механизм адаптации.

Для компенсации воздействия окружающей среды будем использовать адаптивную САУ с заданной явно эталонной моделью (рис. 25). В качестве эталонной модели возьмем динамическое звено 3-го порядка с передаточной функцией, описанной формулой

$$W(p) = \frac{1}{p^3 + 5p^3 + 5p + 1}.$$

Сигнал поправки, формируемый в контуре адаптации, приведен в формуле

$$L = (y - y_e) y_e \frac{-gTz}{z - 1},$$

где y – выходной сигнал замкнутой САУ, y_e – выходной сигнал эталонной модели, g – параметр обучения от 0 до 1 (пусть, например, равен 0.4), T – период квантования (0.001), z – дискретный оператор.

Выходной сигнал после поправки $y = LU$, где L – сигнал поправки, U – управляющее воздействие регулятора.

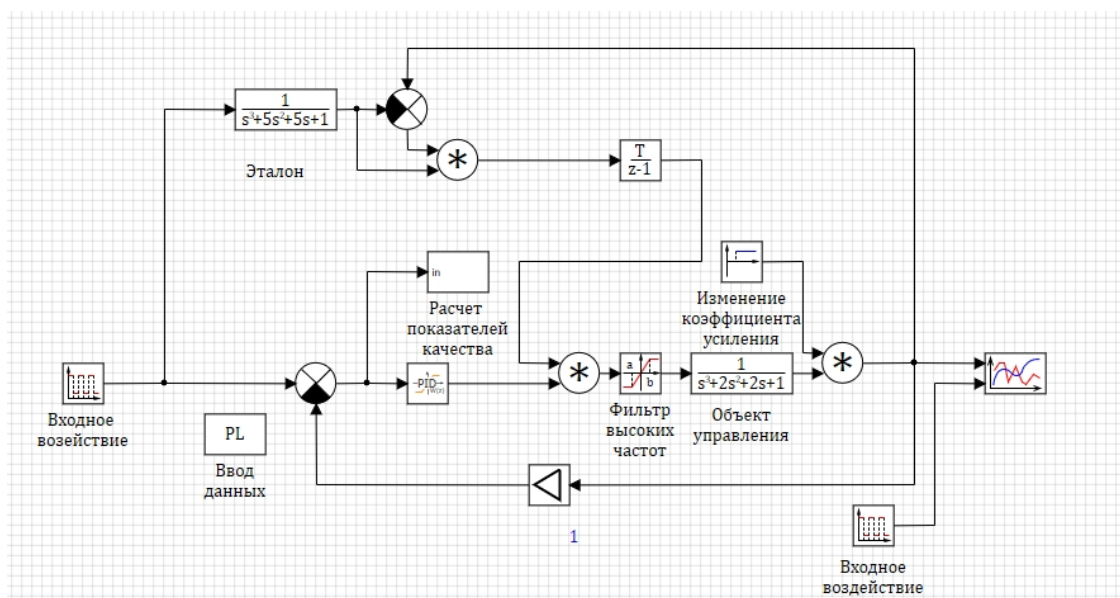


Рис. 25. Схема САУ с механизмом адаптации.

За ввод параметров отвечает программа, написанная на языке Python, которая вызывается внутри блока программирования. Диалоговое окно представлено на рис. 26. Пользователю предлагается указать порядок системы управления, параметры эталонной модели и объекта управления и шаг их изменения (при необходимости), амплитуду и момент изменения коэффициента усиления системы. Введенные данные в виде соответствующих векторов значений возвращаются в схему моделирования SimInTech на первой итерации процесса моделирования. Переходной процесс САУ с механизмом адаптации указан на рис. 27.

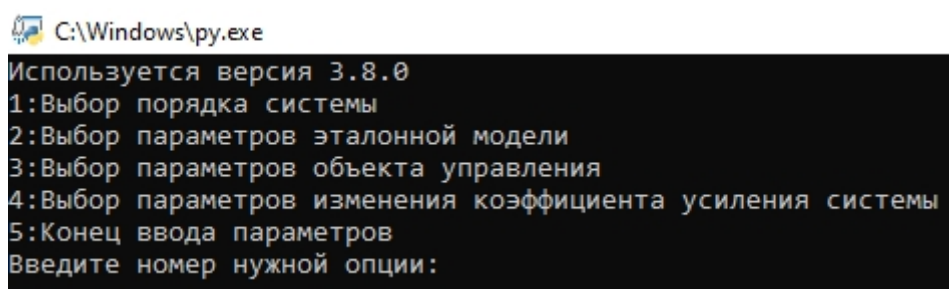


Рис. 26. Диалоговое окно ввода параметров.

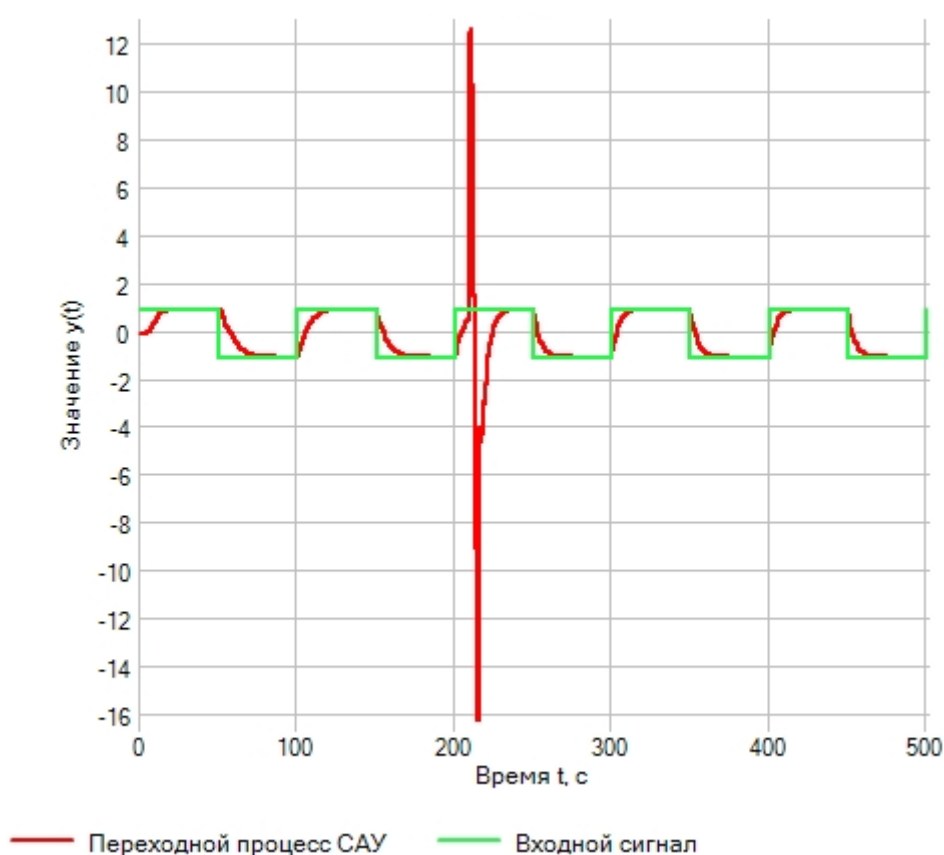


Рис. 27. Переходной процесс адаптивной САУ.

На рис. 27 видно, что после изменения коэффициента усиления переходной процесс протекает гладко, без высокочастотных колебаний. Время регулирования в пределах одного меандра после скачка составляет 20 с модельного времени, а перерегулирование – 0% (переходной процесс протекает без колебаний).

Отметим, что успех применения данного механизма адаптации зависит от выбранной эталонной модели. При слишком сильном различии объекта управления и эталона возможна потеря качества работы системы, что является недостатком данной адаптивной системы.

ПОСТРОЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА САУ ОТ ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛЯТОРА

Помимо решения задачи коррекции качества работы САУ с вычислением численных значений показателей качества (точность, быстродействие и перерегулирование) на базе средств среды SimInTech можно представлять в графическом виде зависимости качества работы САУ от конфигурации используемого регулятора, в данном случае ПИД-регулятора. Для этого реализуем метод многомерного сканирования. Общий вид схемы моделирования остается прежним (но без блока оптимизации), однако изменяется содержимое блока программирования с рис. 14. На рис. 28 представлен портрет решений. Как можно заметить, область допустимых значений представляет собой каньон с почти плоским дном. При слишком низком значении коэффициентов регулятора заметно резкое возрастание времени работы системы.

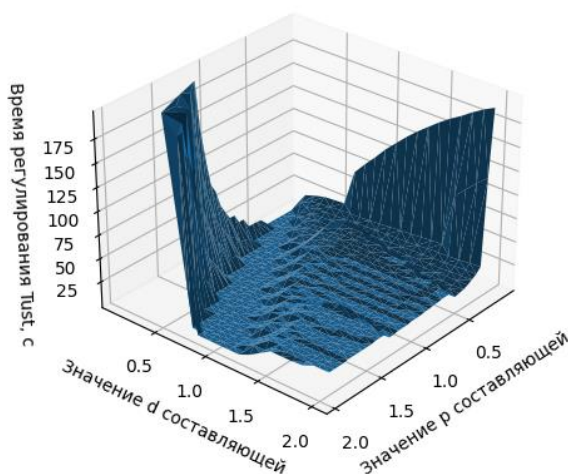


Рис. 28. Графическое представление зависимости времени регулирования от параметров регулятора.

Как и в случае решения задачи коррекции системы автоматического управления, метод многомерного сканирования также применим для САУ произволь-

ного порядка. При необходимости можно задать другие границы изменения параметров регулятора и их шаг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на базе инструментов среды имитационного моделирования среды SimInTech можно реализовывать программные комплексы для изучения основных принципов теории автоматического управления. Использование блока программирования позволяет реализовывать пользовательские программы, а встроенная база данных отлично справляется с хранением результатов моделирования разных сценариев. Представленные программные реализации позволяют проводить коррекцию САУ с целью повышения качества работы системы с минимальным участием пользователя и получать в графическом виде зависимости показателей качества от параметров используемого ПИД-регулятора для дальнейшего изучения. Полученные результаты проведенного исследования могут использоваться при разработке циклов лабораторных работ для студентов энергетических вузов с целью повышения качества подготовки будущих специалистов в области автоматизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теория автоматического управления. Под ред. А.А. Воронова. 1986. Ч. 1. Теория линейных систем автоматического управления. Изд-во «Высшая школа», 1986. 367 с.
2. Системы автоматического управления: теория, применение, моделирования в MATLAB: Учебное пособие для студентов физического факультета. СПб.: Издательство «Лань», 2021. 180 с.
3. Справочник по теории автоматического управления. Под редакцией А.А. Красовского. М.: Изд-во «Наука». Гл. ред. физ. -мат. лит., 1987. 712 с.
4. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т. 1. Линейные системы. М.: ФИЗМАЛИТ, 2003. 288 с.
5. Наладка средств автоматизации и автоматических систем регулирования: Справочное пособие. А.С. Ключев, А.Т. Лебедев, С.А. Ключев, А.Г. Товарное; Под ред. А.С. Ключева. М.: Энергоатомиздат, 1989. 368 с.

6. Среда динамического моделирования технических систем SimInTech: Практикум по моделированию систем автоматического регулирования: учебное пособие / Б.А. Карташов, Е.А. Шабаев, О.С. Козлов, А.М. Щекатуров. М.: ДМК Пресс, 2017. С. 241–243.
 7. Хабаров С.П., Шилкина М.Л. Основы моделирования технических систем. Среда SimInTech: учебное пособие. Санкт-Петербург: Лань 2019. 92 с.
 8. Справочная система среды SiminTech. <https://help.simintech.ru>
-

DEVELOPMENT OF AUTOMATED PROGRAMS FOR SOLVING APPLIED TASKS IN THE FIELD OF AUTOMATION BASED ON THE SIMINTECH ENVIRONMENT

Y. R. Savvin¹ [0009-0003-6920-9283], **D. V. Vershinin**² [0009-0006-2603-8914]

^{1, 2}*National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,
Moscow, Russia*

¹savvinyr@mpei.ru, ²vershinindv@mpei.ru

Abstract

This article is devoted to the study of the possibilities of the SimInTech simulation environment for creating a software package suitable for identifying dependencies between the parameters of the automatic control system (ACS) and the quality indicators of its operation. The article discusses the tools of the selected environment, based on which a set of educational models has been developed. The article shows the results of the above-mentioned educational complex in the form of solving the problem of correcting a linear continuous automatic control system with negative feedback using a PID controller that is part of the automatic control system, the problem of adaptive control of a linear continuous system with a clearly defined reference model, and the problem of multidimensional scanning to identify the patterns of the selected system

Keywords: *automatic control system (ACS), PID controller, linear continuous system, automation, SimInTech simulation environment.*

REFERENCES

1. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. Pod red. A.A. Voronova. 1986. Ch. 1. Teoriya lineinyh system avtomaticheskogo upravleniya, Izdatelstvo "Vishaya shkola", 1986, 367 s.
2. Sistemi avtomaticheskogo upravleniya: teoriya, primenenie, modelirovanie v MATLAB: Uchebnoe posobie dlya studentov fizicheskogo fakulteta. 4-e izd., ster. SPB: Izdatelstvo "Lan'", 2021. 180 s.
3. Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya. Pod redakciei A.A. Krasovskogo. M.: Izd-vo "Nauka". Gl. red. fiz.-mat. lit., 1987. 712 s.
4. Kim D.P. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. T. 1. Lineynye sistemy. M.: FIZMALIT, 2003. 288 s.
5. Naladka sredstv avtomatizatsii i avtomaticheskikh system regulirovaniya: Spravochnoe posobie. A. S. Klueva. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Energoatomiz. dat, 1989, 368 s: il.
6. Kartashov B.A., Shabaev E.A., Kozlov O.S., Shchekaturov A.M. Sreda dinamicheskogo modelirovaniya tehnikeskikh system SimInTech: Praktikum po modelirovaniu system avtomaticheskogo regulirovaniya: uchebnoe posobie. M.: DMK Press, 2017. S. 241-243
7. Habarov S.P., Shilkina M.L. Osnovy modelirovaniya tehnikeskikh system. Sreda SimInTech: uchebnoe posobie. Sankt-Peterburg: Lan', 2019. 92 s.
8. Spravochnaya Sistema sredy SimInTech. <https://help.simintech.ru>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



САВВИН Ярослав Русланович – магистр института информационных и вычислительных технологий национального исследовательского университета МЭИ.

Yaroslav Ruslanovich SAVVIN – master's student at of the Institute of Information and Computing Technologies, National Research University «Moscow Power Engineering Institute».

email: savvinyr@mpei.ru

ORCID: 0009-0003-6920-9283



ВЕРШИНИН Дмитрий Викторович – кандидат технических наук, доцент института информационных и вычислительных технологий национального исследовательского университета МЭИ

Dmitriy Victorovich VERSHININ – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Institute of Information and Computing Technologies, National Research University «Moscow Power Engineering Institute».

email: vershinindv@mpei.ru

ORCID: 0009-0006-2603-8914

Материал поступил в редакцию 2 июня 2026 года

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ ДЛЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ АРХИТЕКТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАНДАРТОВ SYCL И OPENMP

О. Ю. Шамаева¹ [0009-0006-3041-6682], А. М. Чернецов² [0000-0001-7655-2395],

Л. А. Зинченко³ [0000-0002-2298-8721]

^{1, 2}Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

³Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, г. Москва, Россия

¹shamayevaou@mpei.ru, ²chernetsovam@mpei.ru, ³lyudmillaa@mail.ru

Аннотация

Представлены результаты исследований параллельных приложений для гетерогенных архитектур с использованием стандарта SYCL и его реализации DPC++, а также технологии OpenMP, разработанные студентами кафедры прикладной математики и искусственного интеллекта (ПМИИ) ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в ходе выполнения научно-исследовательских работ. В качестве прикладной задачи рассмотрен поиск кратчайших путей в графах различной размерности с использованием алгоритмов Беллмана-Форда и дельта-шага.

Алгоритм Беллмана – Форда легко поддается распараллеливанию и продемонстрировал отличную масштабируемость. Для алгоритма дельта-шага, напротив, использование GPU не дало заметного ускорения из-за сложности согласования памяти и необходимости многократного копирования данных между устройствами.

Тестирование проводилось с использованием следующих аппаратных средств: центральный процессор Intel Core i5-12400F (6 ядер, 12 потоков), графический процессор NVIDIA GeForce GTX1660 (1408 CUDA-ядер). Результаты тестирования показывают, что даже в рамках одной вычислительной задачи различные реализации могут демонстрировать разное поведение при изменении параметров задачи. Это подтверждает важность предварительного анализа и тестирования при выборе аппаратно-программной архитектуры для задач, требующих высокой производительности.

Разработанный комплекс программ визуализирует зависимость ускорения параллельных реализаций алгоритма от числа вершин в графе при различных параметрах метода и успешно используется в учебно-научном процессе кафедры ПМИИ ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ».

Ключевые слова: *гетерогенная архитектура, задача поиска кратчайших путей в графе, стандарт SYCL, язык DPC++, технология OpenMP.*

ВВЕДЕНИЕ

Задача поиска кратчайшего пути в графе является одной из фундаментальных проблем теории графов и алгоритмической оптимизации. Ее актуальность обусловлена широким спектром приложений в современных технологических и научных областях. Перечислим основные из них.

- *Транспортные системы и навигация.* Алгоритмы поиска кратчайшего пути лежат в основе картографических сервисов, логистических систем и управления трафиком, а также в основе навигации беспилотных транспортных средств, которые должны адаптироваться к изменяющимся дорожным условиям, пробкам и авариям.

- *Телекоммуникационные сети. Маршрутизация данных в интернете, оптимизация пропускной способности сетей.* Маршрутизация данных должна учитывать не только кратчайший путь, но и параметры задержки, нагрузки и безопасности. Алгоритмы на основе графов помогают балансировать трафик между узлами.

- *Биоинформатика. Анализ молекулярных взаимодействий, моделирование метаболических путей.* Моделирование белковых взаимодействий или метаболических путей требует анализа графов с миллиардами узлов. Например, поиск кратчайшего пути между генами помогает идентифицировать мишени для лекарств.

- *Социальные сети и рекомендательные системы. Поиск связей между пользователями, предсказание интересов.* Кратчайший путь помогает определять «степень влияния» между людьми или находить целевые аудитории для рекламы.

- *Финансы и безопасность.* Алгоритмы поиска пути помогают находить оптимальные цепочки сделок на финансовых рынках. В блокчейн-сетях анализ

транзакционных графов помогает выявлять мошеннические схемы. Например, алгоритмы поиска пути используются для отслеживания движения криптовалют между кошельками.

С развитием технологий больших данных (Big Data) и Интернета вещей (IoT) объемы обрабатываемых графов растут экспоненциально. Например, социальные сети содержат миллиарды узлов, а транспортные системы мегаполисов генерируют графы с миллионами ребер, что требует разработки высокопроизводительных решений, способных эффективно работать в условиях ограниченных ресурсов и жестких временных рамок. При этом современные графы часто обладают свойствами, которые усложняют их обработку: динамичность, гетерогенность, масштабность.

Кроме того, переход к гетерогенным вычислительным архитектурам (CPU + GPU, FPGA, AI-ускорители) делает актуальным исследование методов распараллеливания алгоритмов для таких систем. Современные стандарты, такие как SYCL [1, 2] и его реализация DPC++ [3], предоставляют инструменты для кросс-платформенной разработки, что открывает новые возможности для оптимизации трудоемких задач.

В учебном процессе кафедры прикладной математики и искусственного интеллекта (ПМИИ) ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ» по дисциплинам «Архитектура вычислительных систем» и «Параллельное программирование и параллельные системы» для решения задач в модели с общей памятью изучают стандарт OpenMP [4]. Однако этот стандарт оказался неэффективным для современных гетерогенных вычислительных архитектур, что было установлено в ходе проведенных исследований. В настоящей работе на примере решения задачи поиска кратчайшего пути в графе исследованы перечисленные выше стандарты для использования в гетерогенных архитектурах.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПОИСКА КРАТЧАЙШЕГО ПУТИ В ГРАФЕ

Рассмотрим задачу поиска кратчайших путей из некоторой вершины во все остальные.

Как известно, граф – это математическая структура, которая используется для представления множества объектов и отношений между ними и состоит из двух ключевых компонентов: вершин (или узлов) и ребер (или дуг).

Вершины – это отдельные объекты в графе. В контексте алгоритмов поиска пути вершины могут представлять физические места, такие как города на карте, или абстрактные концепции, такие как состояния в задаче планирования.

Ребра – это связи между вершинами. Ребра могут быть взвешенными или невзвешенными, а также направленными или ненаправленными. Во взвешенном графе каждому ребру присваивается значение (вес), представляющее стоимость или расстояние между двумя вершинами. В направленном графе ребра указывают направление перехода от одной вершины к другой.

Путь в графе – это последовательность вершин, в которой каждая вершина связана с следующей вершиной в последовательности ребром. Длина пути обычно определяется как сумма весов всех ребер в пути в взвешенном графе или просто как количество ребер в пути в невзвешенном графе.

Сформулируем теперь саму задачу. Пусть дан неориентированный граф $G = (V, E)$, $|V| = n$ – число вершин, $|E| = m$ – число ребер графа с неотрицательными весами. Необходимо найти кратчайшие пути из вершины s во все остальные.

Из всего многообразия существующих алгоритмов поиска кратчайшего пути в графе [5, 6] нами исследованы два базовых алгоритма, принципиально различающихся с точки зрения возможности разработки их параллельных модификаций.

АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ ПРИКЛАДНОЙ ЗАДАЧИ

Алгоритм Беллмана – Форда

Несмотря на то что рассматриваются графы, у которых веса ребер положительные, алгоритм Беллмана – Форда позволяет найти кратчайшие пути из одной вершины графа до всех остальных, даже для графов, в которых веса ребер могут быть отрицательными. Однако, в графе не должно быть циклов от-

рицательного веса, достижимых из начальной вершины, в противном случае вопрос о кратчайших путях является бессмысленным.

На первом шаге инициализируем массив dist расстояний от исходной вершины до всех остальных вершин. Все значения установим как бесконечные, а расстояние до исходной вершины примем равным 0. На вход алгоритм принимает массив ребер графа, и он используется следующим образом: запускается цикл по количеству вершин в графе, на каждом шаге этого цикла для всех ребер $E(u, v)$ производится попытка проведения релаксации. Релаксация в данном случае выглядит следующим образом: производится сравнение величины расстояния от исходной вершины до вершины v ($\text{dist}[v]$) и расстояния от исходной вершины до вершины u в сумме с ребром $E(u, v)$, лежащим между вершинами u и v , т. е. $\text{dist}[u] + w(u, v)$. Выбирается меньшая из этих величин и записывается в качестве расстояния от исходной вершины до вершины v . При этом работу алгоритма можно завершить на шаге k , если dist на этом шаге равен dist на шаге $k + 1$, т. е. за очередной шаг цикла не было успешных релаксаций [6].

Продемонстрируем работу алгоритма на примере графа, изображенного на рис. 1.

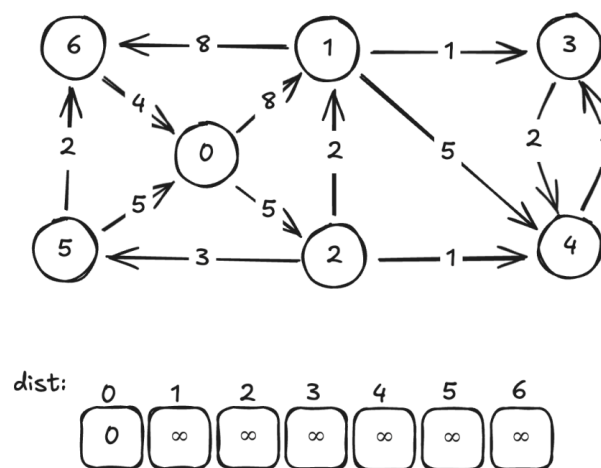


Рис. 1. Пример применения алгоритма Беллмана – Форда. Первый шаг.

Пусть необходимо узнать кратчайшие расстояния от вершины 0 до всех остальных вершин. На первом шаге значение $\text{dist}[i]$ известно только для $i = 0$. На рис. 2 отмечены ребра, для которых была произведена релаксация.

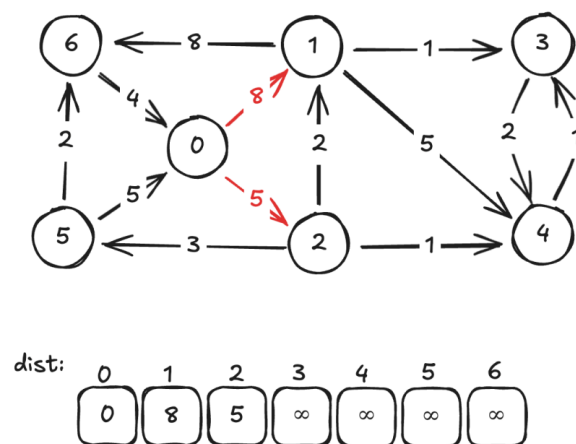


Рис. 2. Пример применения алгоритма Беллмана – Форда. Продолжение.

Для остальных ребер релаксация была unsuccessful, так как расстояния *dist* до остальных вершин, кроме 0, были неизвестны. После первого шага алгоритма удалось получить расстояния до вершин 1 и 2. Красным отмечены те ребра, которые были использованы на этом шаге для нахождения расстояний. На рис. 3 отмечены ребра, для которых была произведена релаксация на втором шаге.

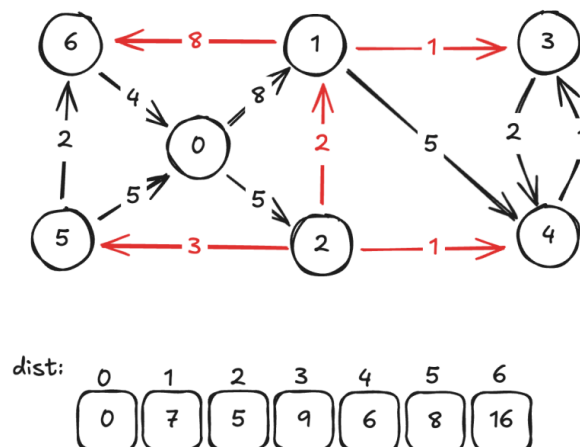


Рис. 3. Пример применения алгоритма Беллмана – Форда. Второй шаг.

После второго шага удалось получить расстояния до всех вершин, однако при последующих шагах алгоритма эти расстояния могут уменьшиться. На рис. 4 отмечены ребра, для которых была произведена релаксация на третьем шаге, и показаны величины получившихся расстояний от вершины 0.

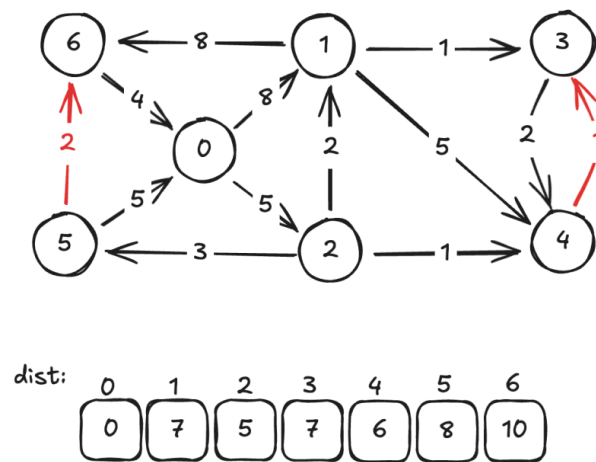


Рис. 4. Пример применения алгоритма Беллмана – Форда. Третий шаг.

После третьего шага удалось получить меньшие расстояния для вершин 3 и 6. При следующем шаге ни для одной вершины улучшить расстояние не удалось, поэтому останавливаем работу алгоритма.

Сложность такого алгоритма равна $O(mn)$. Видно, что для плотных графов (где $m \sim n^2$) сложность близка к $O(n^3)$, а для разреженных графов (где $m \sim n$) – $O(n^2)$.

Алгоритм Дейкстры

Алгоритм Дейкстры – это алгоритм поиска пути, который был разработан голландским ученым Эдсгером Дейкстрой в 1959 г. Алгоритм используют для поиска кратчайшего пути во взвешенном графе от одной вершины (начальной) до всех остальных вершин. Основная идея состоит в том, что выполняется обход графа в ширину с пересчетом оценки расстояния от источника до других вершин. Жадный принцип – это продвижение по ребрам с меньшим весом.

Создается множество S , содержащее уже обработанные вершины (изначально пустое). Создается также множество Q , содержащее все остальные вершины графа (изначально содержит все вершины графа). При этом каждой вершине графа присваивается вес, который представляет минимальную известную длину пути от начальной вершины до данной. Для начальной вершины этот вес равен 0, для всех остальных вершин – бесконечность. На каждом шаге алгоритм выбирает вершину из непосещенного множества с наименьшим весом, перемещает эту вершину в множество посещенных вершин и производит

релаксацию (обновление весов всех соседей выбранной вершины). Вес соседа обновляется, если через выбранную вершину можно добраться до этого соседа с меньшей длиной пути. Процесс продолжается, пока не будут посещены все вершины [5].

Продемонстрируем работу алгоритма Дейкстры на примере графа, изображенного на рис. 5.

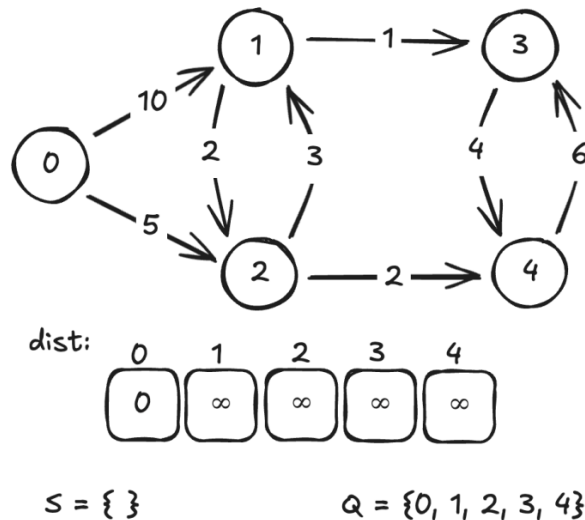


Рис. 5. Пример применения алгоритма Дейкстры.

Пусть необходимо узнать кратчайшие расстояния от вершины 0 до всех остальных вершин. На первом шаге величина $dist[i]$ известна только для только для $i = 0$. На рис. 6. отмечены ребра, для которых будет произведена релаксация на первом шаге.

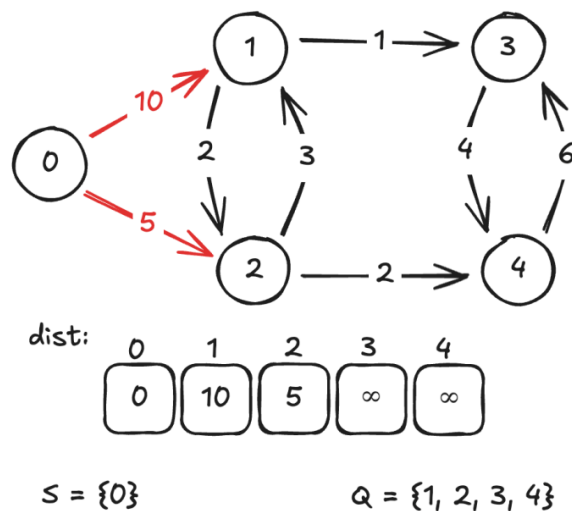


Рис. 6. Пример применения алгоритма Дейкстры. Первый шаг.

Основной была выбрана вершина 0, так как у нее было наименьшее (и единственно известное) расстояние $dist$. Вершина 0 была помечена как посещенная и удалена из списка Q непосещенных вершин. На рис. 7 отмечены ребра, для которых будет произведена релаксация на втором шаге.

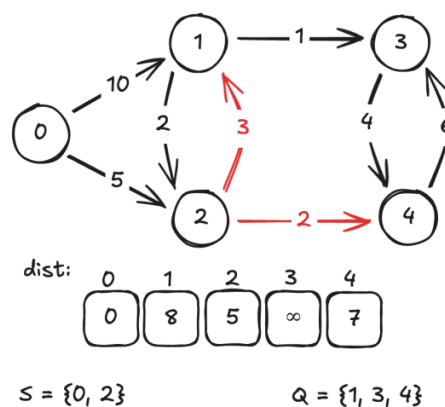


Рис. 7. Пример применения алгоритма Дейкстры. Второй шаг.

Основной была выбрана вершина 2, так как у нее было наименьшее значение $dist$ из непосещенных. Таким образом было найдено расстояние до вершины 4 и улучшено расстояние до вершины 1. На рис. 8 показаны последующие шаги алгоритма Дейкстры.

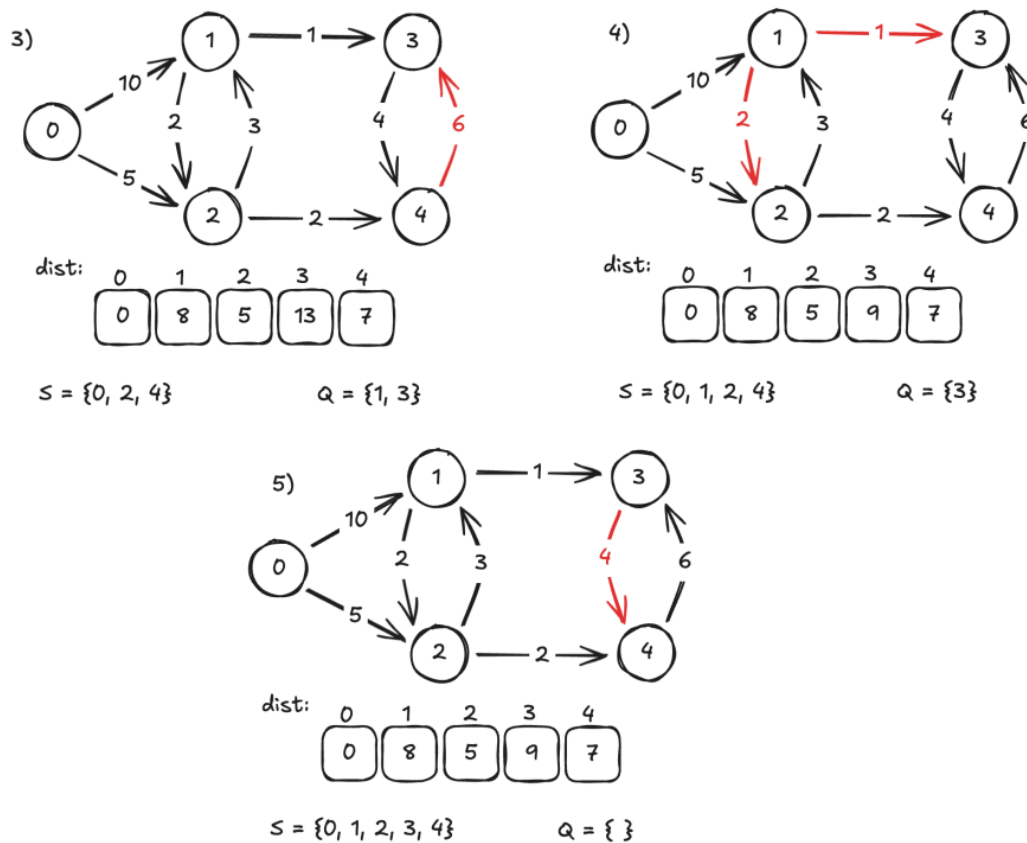


Рис. 8. Пример применения алгоритма Дейкстры. Третий шаг.

Шаги алгоритма повторяются, пока множество непосещенных вершин не станет пустым. Таким образом находятся все кратчайшие пути из вершины 0.

Асимптотика такого алгоритма составит $O(n^2)$: на каждой итерации находим минимум за $O(n)$ и проводим $O(n)$ релаксаций. Однако минимум можно искать быстрее при использовании специализированной структуры, которая поддерживает добавление элементов и нахождение минимума – кучи (приоритетной очереди).

Анализируя приведенные алгоритмы с точки зрения возможности распараллеливания и эффективной дальнейшей реализации на гетерогенных системах, можно заключить, что алгоритм Беллмана – Форда ориентируется на релаксацию всех ребер и хорошо масштабируется при распараллеливании, тогда как второй алгоритм построен на жадной стратегии и плохо поддается массовому параллелизму.

Такое сравнение особенно важно в контексте дальнейшей реализации на гетерогенных системах.

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ МОДИФИКАЦИИ АЛГОРИТМОВ

Приведем параллельные модификации рассмотренных выше алгоритмов.

Параллельная модификация алгоритма Беллмана – Форда

Параллельная модификация алгоритма Беллмана – Форда принципиально не отличается от последовательного алгоритма. Поскольку на каждом шаге алгоритма можно независимо обрабатывать все ребра графа, эту часть обработки можно выполнять параллельно. Приведем псевдокод параллельного алгоритма:

для каждого i от 1 до n :
параллельно для каждого ребра $E(u, v)$ в графе:
 если $\text{dist}[u] + w(u, v) < \text{dist}[v]$:
 $\text{dist}[v] = \text{dist}[u] + w(u, v)$;
дождаться выполнения параллельных вызовов;
Если не было изменений в dist на этом шаге:
 остановить работу алгоритма.

Параллельная модификация алгоритма Дейкстры

Классический алгоритм Дейкстры по своей природе слабо поддается распараллеливанию, так как предполагает последовательную обработку вершин, что сильно ограничивает масштабируемость на многоядерных системах. В связи с этим будем рассматривать не сам алгоритм Дейкстры, а его адаптированную версию – алгоритм дельта-шага (*delta-stepping*), который был разработан именно с учетом возможности параллельной обработки и считается одной из наиболее удачных модификаций для многопоточной среды.

Суть алгоритма заключается в том, чтобы группировать вершины по диапазонам расстояний – в отличие от классического подхода, где вершины обрабатываются строго по одной, начиная с ближайшей. Такой подход позволяет обрабатывать целые группы вершин одновременно, что значительно повышает эффективность при выполнении на устройствах с поддержкой параллельных вычислений [7].

Ключевым параметром здесь выступает величина дельта (Δ). Она определяет, где проходит граница между так называемыми «легкими» и «тяжелыми» ребрами графа. По сути, Δ управляет тем, насколько мелко или крупно будут выделены диапазоны расстояний. При правильно подобранном значении Δ можно добиться хорошего баланса между уровнем параллелизма и издержками на синхронизацию между потоками.

Алгоритм начинается с инициализации расстояний до всех вершин как бесконечно больших, за исключением начальной вершины, расстояние до которой устанавливается равным нулю. Затем выполняется серия итераций, каждая из которых состоит из двух этапов.

На первом этапе алгоритм обрабатывает так называемые «легкие» ребра, те, вес которых меньше выбранного параметра Δ . Вершины группируются в «корзины» (buckets) в соответствии с текущими оценками расстояний до них. В i -й корзине содержатся вершины, текущая оценка расстояния до которых удовлетворяет неравенству $\Delta * i \leq \text{dist} \leq \Delta * (i + 1)$. Все вершины, находящиеся в одной корзине, могут обрабатываться параллельно, так как их расстояния лежат в одном диапазоне [8].

Второй этап посвящен обработке «тяжелых» ребер, вес которых превышает Δ . Эти ребра требуют более аккуратной обработки и дополнительной синхронизации между параллельными потоками.

Таким образом, алгоритм можно описать следующей последовательностью шагов.

1. Выбираем корзину с наименьшим индексом, содержащую вершины.
2. Повторяем, пока текущая корзина не станет пустой:
 - извлекаем все вершины из текущей корзины;
 - обрабатываем «легкие» ребра этих вершин:
 - производим релаксацию для каждого ребра, т. е. пытаемся уменьшить расстояние до соседних вершин;
 - после релаксации расстояние от вершины-источника до обработанных вершин могло измениться, поэтому перемещаем вершины в соответствующие новые корзины;
 - обрабатываем «тяжелые» ребра для всех обработанных ранее вершин:

— аналогично обновляем расстояния и перемещаем вершины в новые корзины.

3. Алгоритм завершает работу, когда все корзины становятся пустыми. На этом этапе оценки расстояний содержат длины кратчайших путей от начальной вершины до всех остальных вершин графа.

Рассмотрим работу алгоритма дельта-шага на примере поиска всех кратчайших расстояний от вершины 0 до всех остальных вершин

Выберем $\Delta = 4$. У вершины 0 нет «легких» ребер, поэтому сразу обрабатываются «тяжелые» ребра. На рис. 9 отмечены ребра, которые будут обработаны на первом шаге.

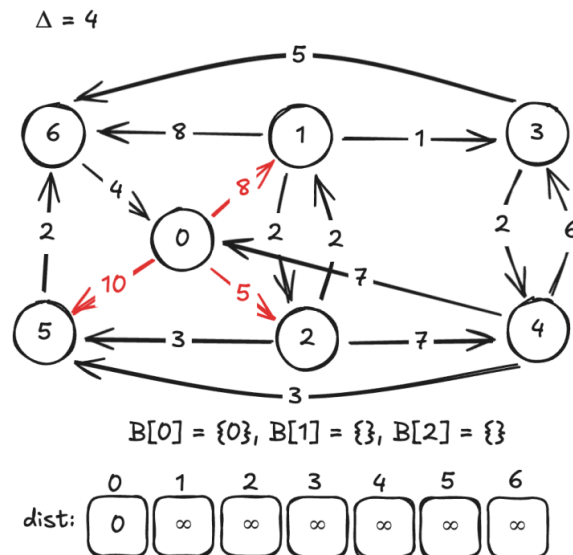
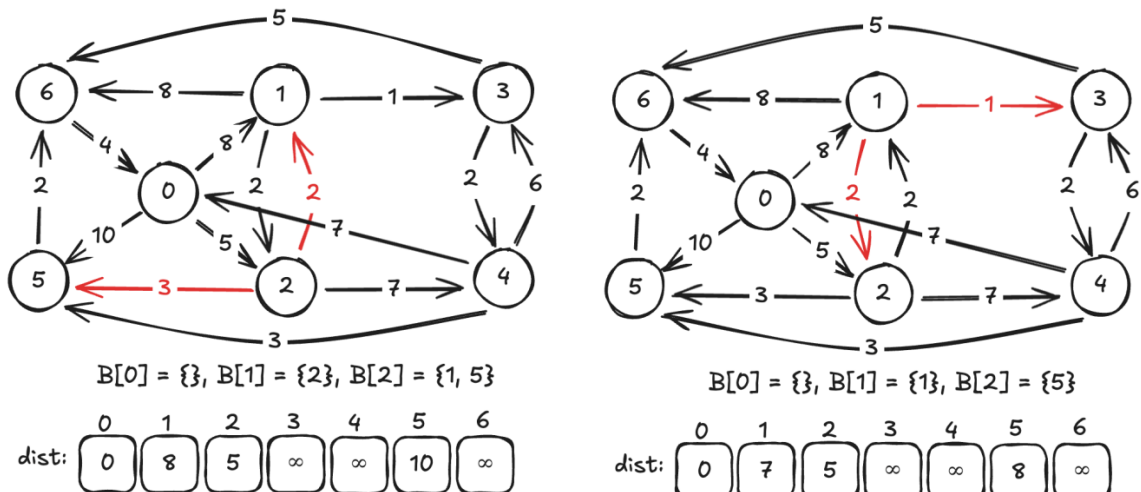


Рис. 9. Пример применения алгоритма дельта-шага.

Все вершины корзины $B[0]$ были обработаны, поэтому переходим к обработке корзины $B[1]$. Сначала обрабатываются «легкие» ребра. На рис. 10 отмечены все «легкие» ребра, которые будут обработаны на втором шаге.



4.

Рис. 10. Пример применения алгоритма дельта-шага. Первый шаг.

Затем обрабатываются все «тяжелые» ребра вершин, обработанных в корзине $B[1]$. На рис. 11 отмечены все «тяжелые» ребра, которые будут обработаны на втором шаге.

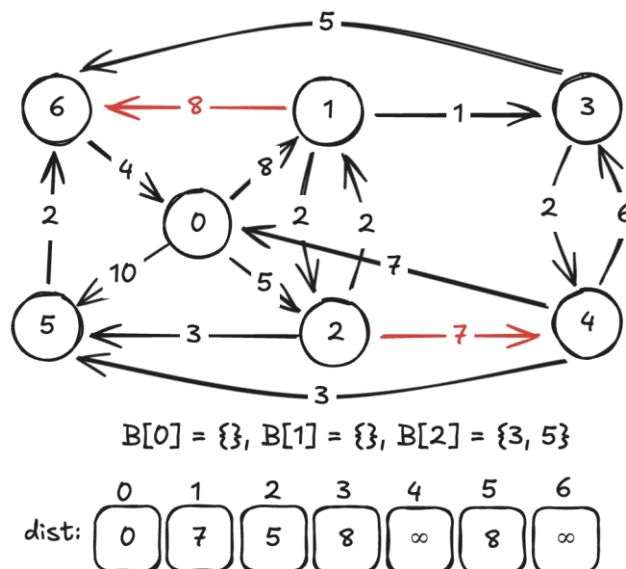


Рис. 11. Пример применения алгоритма дельта-шага. Второй шаг.

Аналогично обрабатываются сначала «легкие», а затем «тяжелые» ребра для вершин из корзины $B[2]$. На рис. 12 отмечены все ребра, которые будут обработаны на третьем шаге. При этом параллельно можно выполнять каждый шаг релаксации ребер – и «легких», и «тяжелых».

Подбор правильного параметра Δ очень важен: при $\Delta = 0$ алгоритма дельта-шага превращается в алгоритм Дейкстры, а при $\Delta = \infty$ – в алгоритм Беллмана – Форда.

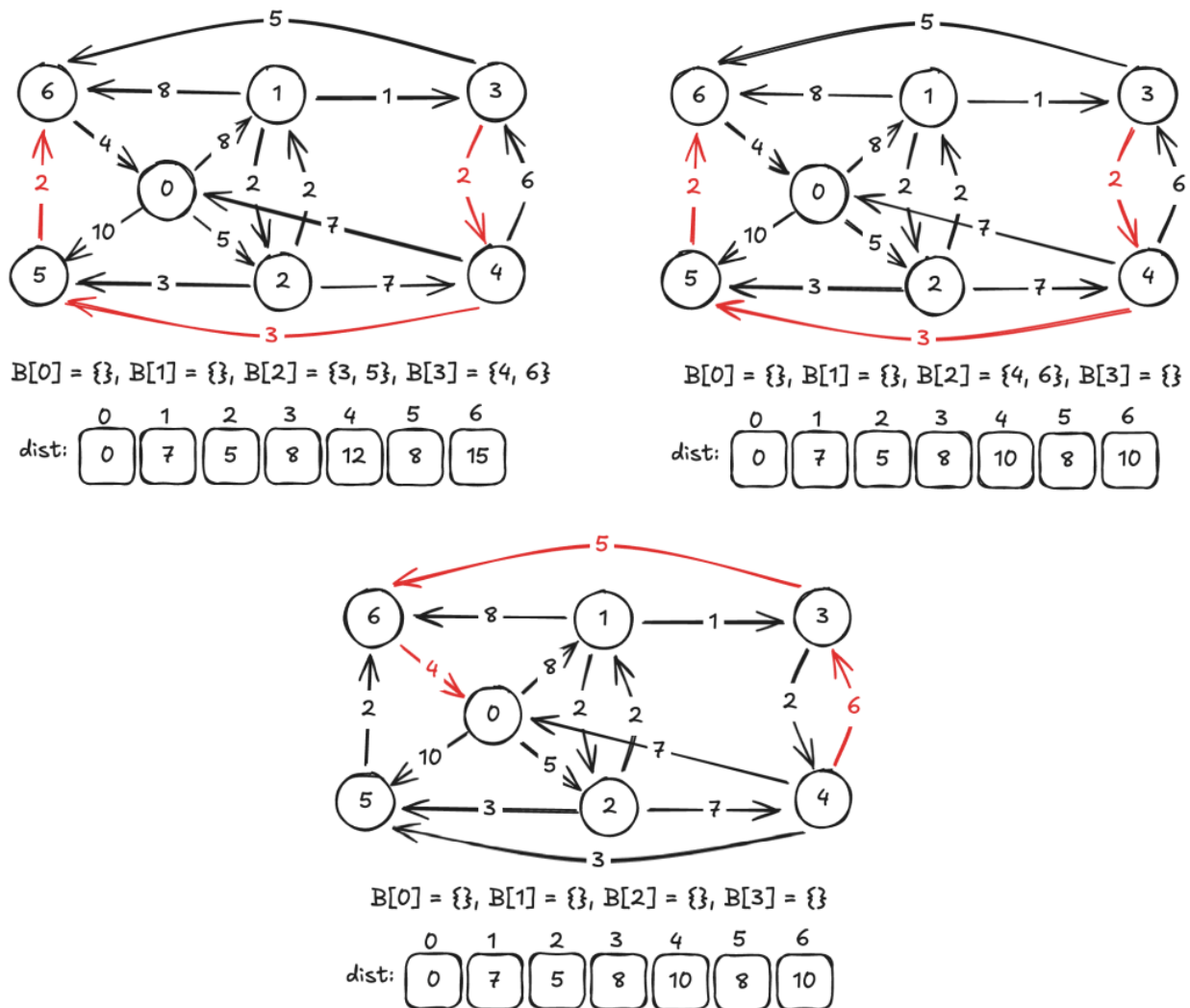


Рис. 12. Пример применения алгоритма дельта-шага. Третий шаг.

Разработанные параллельные модификации классических алгоритмов адаптированы к вычислительным средам с возможностью масштабирования и последующего исполнения на гетерогенных устройствах.

РЕАЛИЗАЦИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЛОЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАНДАРТОВ SYCL и OPENMP

Приведем результаты исследования разработанных параллельных модификаций с использованием стандартов SYCL и OpenMP для решения задачи поиска кратчайшего пути в графе.

Стандарт SYCL как универсальная модель программирования

Современный этап технологического развития IT-индустрии предъявляет повышенные требования к вычислительным ресурсам. Возрастающая сложность вычислений требует новых подходов и решений, способных эффективно использовать потенциал смешанных вычислительных систем. Все чаще для решения ресурсоемких задач применяют гетерогенные системы, объединяющие в рамках одной архитектуры разные процессоры. Как правило, это CPU, GPU, а также специализированные ускорители, такие как FPGA или ASIC. Основная идея здесь проста: использовать каждое устройство строго по его профилю, отдавая, например, параллельные задачи на GPU, а ветвистую логику – на CPU. Все это делается ради увеличения общей производительности и снижения времени вычислений. Такой подход открывает широкие горизонты, но и ставит перед разработчиками немало задач: от грамотного распределения нагрузки до согласования взаимодействия между компонентами.

В этой связи возникает потребность в инструментах, способных абстрагировать сложность работы с такими системами. Одним из наиболее удачных решений стал стандарт SYCL [1, 2] – он предлагает удобную и в то же время гибкую модель программирования для гетерогенных платформ. С его помощью можно написать код, который одинаково успешно выполняется на CPU, GPU и других ускорителях, не вдаваясь каждый раз в тонкости конкретного компонента. SYCL предлагает разработчику набор понятий и инструментов, позволяющих сфокусироваться на логике приложения, не теряя контроля над производительностью.

Надстройкой над SYCL служит язык DPC++ (Data Parallel C++) [3], созданный компанией Intel. Он расширяет стандарт, добавляя инструменты более тонкой настройки параллельных вычислений. Это особенно ценно в задачах,

связанных с научными расчетами, машинным обучением и высокопроизводительной аналитикой данных.

Следует подчеркнуть, что стандарт SYCL совместно с DPC++ можно рассматривать как универсальную модель программирования высокого уровня, представляющую современный и мощный инструмент для построения переносимых, эффективных и масштабируемых приложений на архитектурах с несколькими типами вычислительных устройств.

Результаты тестирования приложений

Разработанные параллельные приложения были протестированы на следующих аппаратных средствах: центральный процессор Intel Core i5-12400F (6 ядер, 12 потоков), графический процессор NVIDIA GeForce GTX1660 (1408 CUDA-ядер). Используемое программное обеспечение: SYCL 2020 (revision 10), DPC++ 2025.1, OpenMP 5.1, C++20.

Были проведены исследование и сравнение пяти реализаций:

- последовательная с использованием C++;
- параллельная с использованием DPC++ исполняемая на CPU;
- параллельная с использованием DPC++ исполняемая на CPU+GPU;
- параллельная с использованием OpenMP исполняемая на CPU;
- параллельная с использованием OpenMP исполняемая на CPU+GPU.

Основное отличие последовательной программы от параллельной состоит в том, что внутренний цикл запускается параллельно по всем ребрам. В стандарте SYCL это делается с помощью метода `parallel_for`, а в стандарте OpenMP – с помощью директивы `#pragma omp parallel for`. При этом если нашлась вершина, расстояние до которой может быть улучшено, то нужно обеспечить атомарность этого сравнения и присвоения нового значения.

Для тестирования был использован случайно сгенерированный граф, сформированный таким образом, что каждая его вершина соединена с другой вершиной с некоторой заданной вероятностью. Случайные графы имеют множество применений, например позволяют моделировать случайные социальные связи, изучать взаимодействия между людьми в Интернете.

Программа для тестирования генерирует случайный граф с заданными количеством вершин и вероятностью ребер между вершинами и случайной

длиной ребер в промежутке от 1 до 100, запускает выполнение реализованных алгоритмов нахождения кратчайших путей в графе, сравнивает найденные величины путей и время выполнения алгоритма.

Компиляция кода производилась с соответствующими параметрами, указывающими целевую архитектуру исполняемого приложения. В итоге получили пять исполняемых приложений для каждого из алгоритмов, указанных выше.

Для визуализации сравнения времени выполнения различных вариантов реализаций алгоритма Беллмана – Форда была разработана программа на языке Python 3.12, которая запускает программные реализации и строит графики зависимости времени их выполнения от количества вершин, а также от ускорения относительно последовательной реализации алгоритма.

На рис. 13 представлены графики зависимости ускорения алгоритма Беллмана – Форда от количества вершин в случайном графе при вероятности ребер 0.8 между вершинами.

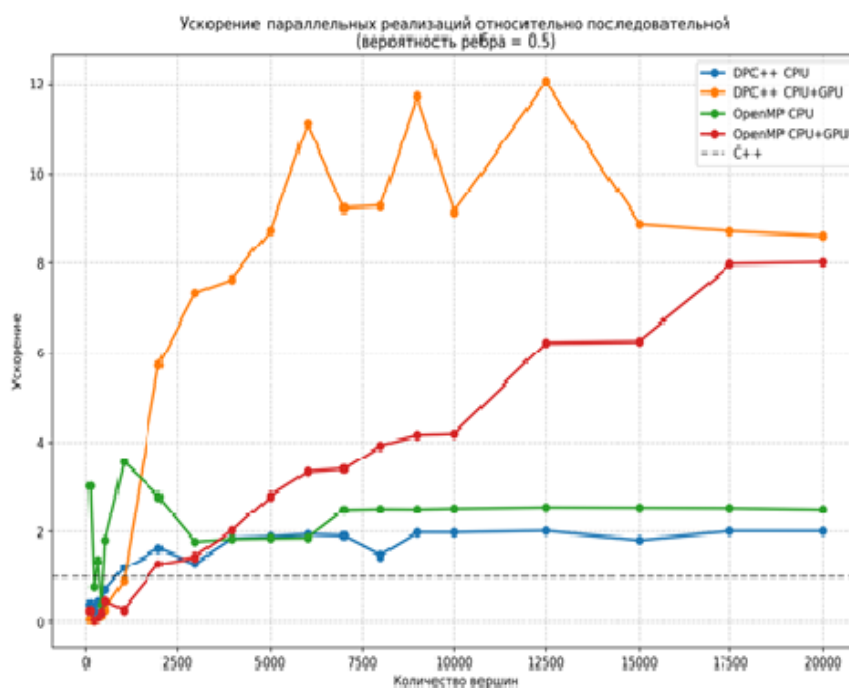


Рис. 13. Зависимость ускорения реализаций алгоритма Беллмана – Форда от количества вершин в графе с вероятностью ребра 0.8.

На рис. 14 приведены графики зависимости ускорения каждой разработанной реализации относительно последовательной версии для алгоритма

Беллмана – Форда от количества вершин в случайном графе с вероятностью 0.8 ребер между вершинами.

Анализ полученных графиков позволил сделать вывод, что реализации алгоритма с использованием гетерогенной архитектуры с CPU и GPU процессорами выполняются примерно в 10 раз быстрее последовательного алгоритма. При этом с увеличением размерности графа ускорение также увеличивается.

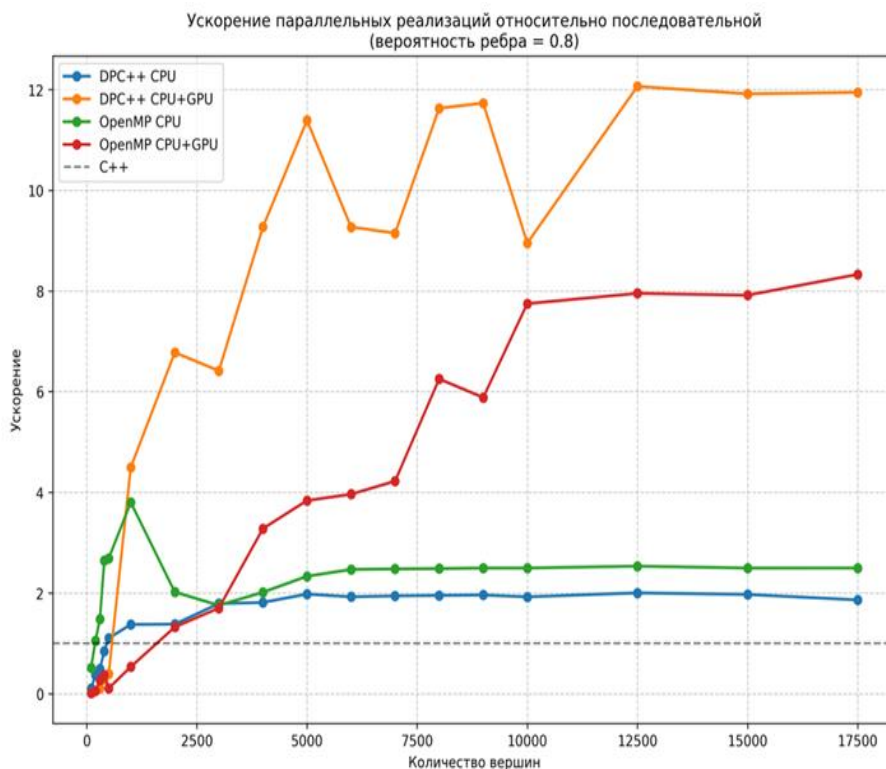


Рис. 14. Зависимость ускорения выполнения реализаций алгоритма Беллмана – Форда от количества вершин в графе с вероятностью ребра 0.8.

На графах небольшой размерности использование гетерогенных многоядерных архитектур не дает положительного эффекта, а, наоборот, ухудшает время выполнения алгоритма. Параллельные реализации с использованием только CPU оказались быстрее последовательного алгоритма примерно в 2 раза. Во всех случаях чем выше размерность графа, тем эффективней использование гетерогенной архитектуры и языка DPC++.

Такое ускорение на GPU получается за счет того, что алгоритм Беллмана – Форда очень хорошо подходит для массивного параллелизма и не требует интенсивной синхронизации данных между процессорами. Это позволяет исполь-

зовать преимущества такой гетерогенной архитектуры, состоящей из CPU и GPU.

Проанализируем время выполнения и ускорение реализаций метода дельта-шага от количества вершин. Как уже отмечалось выше, выбор параметра Δ очень важен для получения лучшего результата. На рис. 15–18 представлены графики зависимости времени выполнения и ускорения для алгоритма дельта-шага от количества вершин с различными значениями параметра $\Delta = 1$ и $\Delta = 100$ для каждой разработанной реализации. Отметим, что в зависимости от выбора параметра Δ время выполнения алгоритма может варьироваться до 20%. Самой быстрой оказалась параллельная реализация только с использованием CPU и стандарта OpenMP.

В реализации алгоритма дельта-шага некоторые переменные были использованы и внутри параллельно исполняющейся части. Это делает неоптимальным использование графического процессора для выполнения параллельной части кода, поскольку эти переменные необходимо часто переносить между устройствами, чтобы поддерживать их значения одинаковыми на обоих процессорах (CPU и GPU).

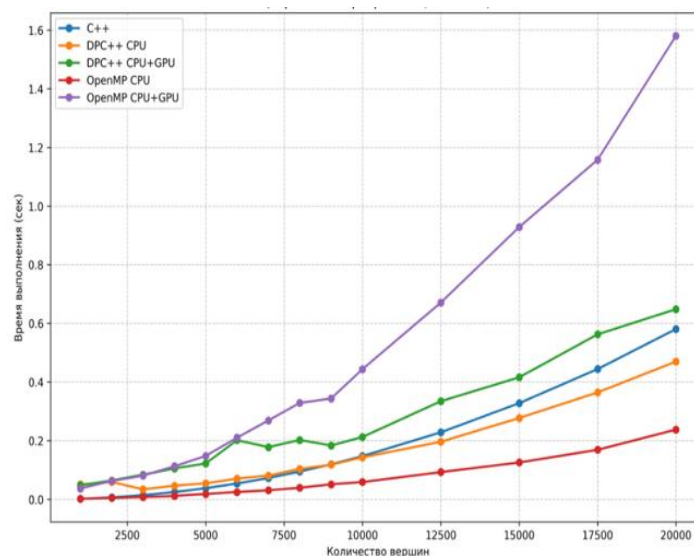


Рис. 15. Зависимость времени выполнения реализаций алгоритма дельта-шага от количества вершин в графе, вероятность ребра 0.9, $\Delta = 1$.

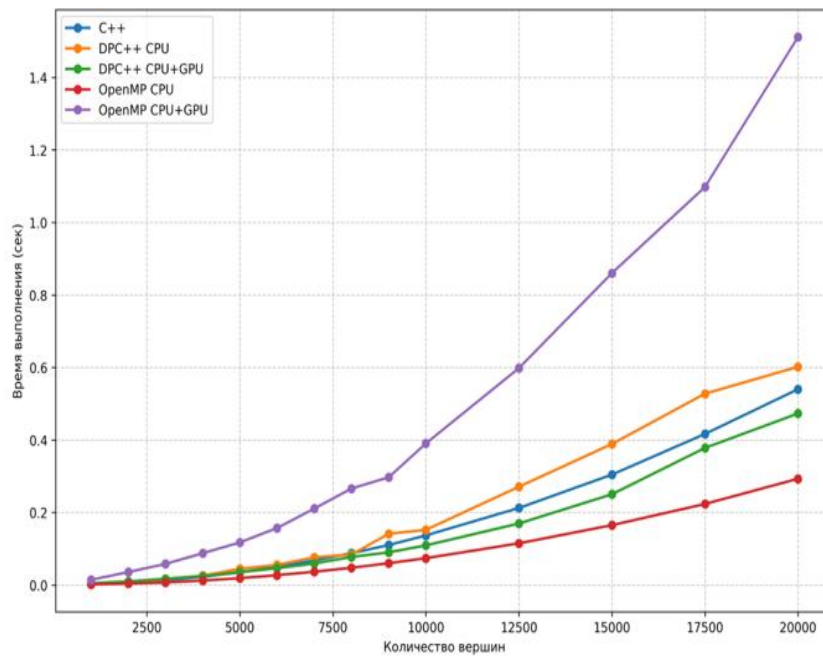


Рис. 16. Зависимость времени выполнения реализаций алгоритма дельта-шага от количества вершин в графе, вероятность ребра 0.9, $\Delta = 100$.

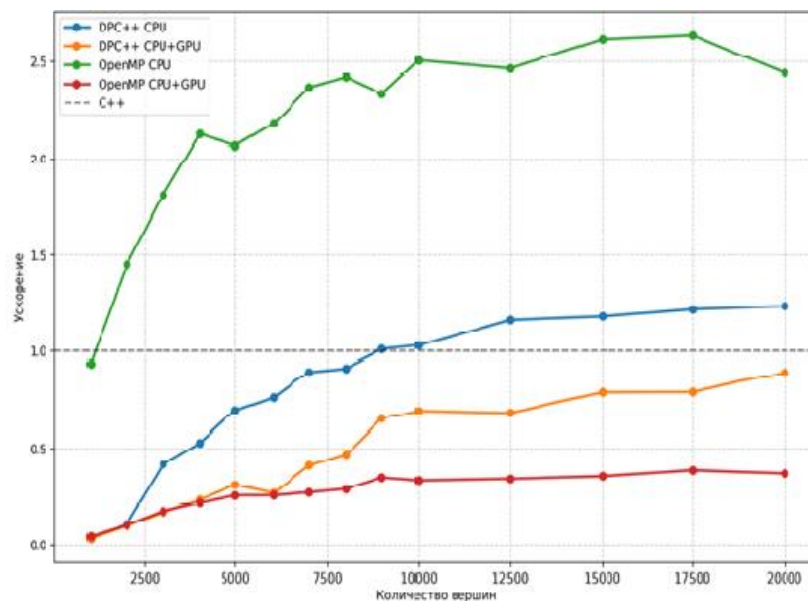


Рис. 17. Зависимость ускорения алгоритма дельта-шага от количества вершин в графе с вероятностью ребра 0.9, $\Delta = 1$.

Постоянное переключение для работы с памятью разных процессоров добавляет накладные расходы, на которые уходит большая часть времени выполнения алгоритма.

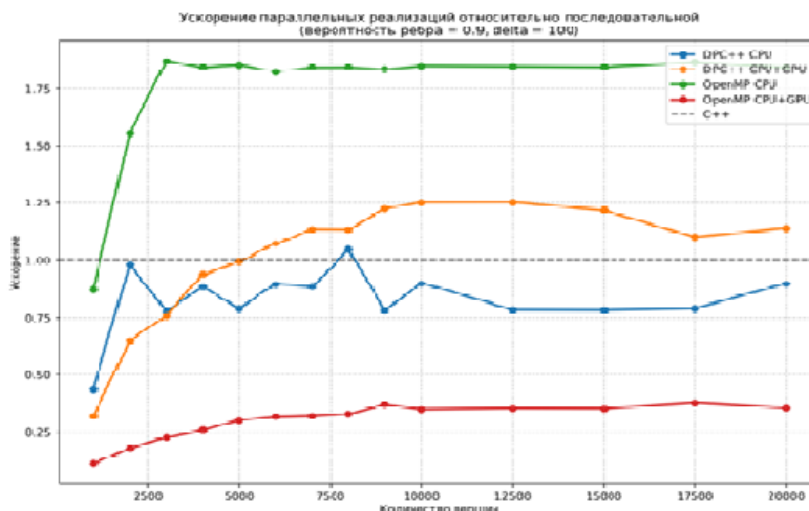


Рис. 18. Зависимость ускорения выполнения реализаций алгоритма дельта-шага от количества вершин в графе, вероятность ребра 0.9, $\Delta = 100$.

В процессе реализации и тестирования приложений в рамках выполненных научно-исследовательских работ студентов было установлено, что алгоритм Беллмана – Форда гораздо более эффективен для использования в гетерогенных средах. Реализация алгоритма демонстрирует значительное ускорение при выполнении на центральном и графическом процессорах, особенно при большой размерности графа. Реализация с использованием стандарта OpenMP позволила добиться ускорения до 8 раз, а с использованием стандарта SYCL – до 12 раз по сравнению с последовательной версией.

Для алгоритма дельта-шага распределение задач между CPU и GPU дало менее однозначный результат: несмотря на параллелизм, заложенный в структуре алгоритма, необходимость частого переноса данных между устройствами и синхронизации состояний значительно уменьшала ускорение. Тестирование показало, что лучшую производительность обеспечивала реализация на OpenMP в многопоточном режиме на центральном процессоре, без привлечения ускорителей.

Полученные в ходе тестирования результаты подтвердили, что эффективность подхода значительно варьируется в зависимости от специфики алгоритма и используемой архитектуры. Гетерогенные решения показали преимущество в задаче с высокой степенью независимого параллелизма при минимальной необходимости синхронизации данных. Для более сложных схем, как

в алгоритме дельта-шага, эффективнее оказалось использование только CPU в многопоточном режиме.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены исследования возможностей гетерогенных архитектур и стандартов SYCL и DPC++, а также OpenMP для эффективного решения задачи поиска кратчайших путей в графах различных размерностей. Исследованы реализации двух разных алгоритмов решения задачи.

Алгоритм Беллмана – Форда продемонстрировал отличную масштабируемость и легко поддается распараллеливанию: реализация на DPC++ с GPU показала наиболее значительное ускорение по сравнению с последовательной версией. Для алгоритма дельта-шага, напротив, использование GPU не дало заметного ускорения из-за сложности согласования памяти и необходимости многократного копирования данных между устройствами. Лучшие результаты были достигнуты при использовании многопоточной OpenMP-реализации.

Было проведено тестирование с использованием следующих аппаратных средств: центральный процессор Intel Core i5-12400F (6 ядер, 12 потоков), графический процессор NVIDIA GeForce GTX1660 (1408 CUDA-ядер). Тестирование позволило выявить зависимости производительности от особенностей алгоритма и архитектуры аппаратной платформы. Полученные данные показывают, что даже в рамках одной вычислительной задачи различные реализации могут демонстрировать разное поведение при изменении плотности графа, числа вершин или параметров исполнения. Это подтверждает важность предварительного анализа и тестирования при выборе программной архитектуры для задач, требующих высокой производительности.

Разработанный комплекс программ визуализирует зависимость ускорения параллельных реализаций алгоритма от числа вершин в графе при различных параметрах метода и успешно используется в учебно-научном процессе кафедры ПМИИ ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ».

Таким образом, основной вывод заключается в необходимости учитывать баланс между универсальностью и спецификой во всех уровнях проектирования вычислительных решений: от выбора алгоритма до конкретных реализаций под выбранную платформу. Современные инструменты, такие как SYCL

и DPC++, безусловно, расширяют горизонты параллельного программирования и делают разработку под гетерогенные архитектуры более доступной. Однако, как было показано, их применение требует внимательного соотнесения теоретической модели задач и практической архитектуры исполнения, только в этом случае можно рассчитывать на достижение действительно ощутимых ускорений.

Результаты, полученные в ходе выполнения работы, не только демонстрируют работоспособность выбранных технических подходов, но и открывают возможности дальнейших исследований в направлении гибридных стратегий вычислений, автоматической настройки параметров алгоритмов под конкретную архитектуру, а также разработки обобщенных фреймворков, которые могли бы адаптивно выбирать тип исполнения в зависимости от характера входных данных.

Благодарности

Авторы благодарны выпускнику кафедры ПМИИ НИУ «МЭИ» М. Д. Ильину за реализацию и тестирование алгоритмов поиска критического пути в графах с использованием SYCL и DPC++, выполненных в рамках НИР. Исходный код программ доступен по ссылке <https://github.com/maximxD/graphs>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. SYCL 2020 Specification (revision 11).
URL: <https://registry.khronos.org/SYCL/specs/sycl-2020/html/sycl-2020.html> (дата обращения: 12.05.2026)
2. SYCL Reference.
URL: https://github.khronos.org/SYCL_Reference/index.html (дата обращения: 12.05.2026)
3. *Reinders James, Ashbaugh Ben, Brodman James, Kinsner Michael, Pennycook John, Tian Xinmin*. Data Parallel C++: Programming Accelerated Systems Using C++ and SYCL. Springer Nature, 2023. 630 p.
<https://doi.org/10.1007/978-1-4842-9691-2>
4. OpenMP standard. URL: <https://www.openmp.org> (дата обращения: 12.05.2026)

5. Роберт Седжвик. Фундаментальные алгоритмы на C++. Алгоритмы на графах: Пер. с англ. СПб: ООО «ДиаСофт», 2002. С. 287–304.
 6. Алгоритмы: построение и анализ. Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2011. С. 672–676.
 7. Meyer U., Sanders P. Δ -stepping: a parallelizable shortest path algorithm // J. of Algorithms. 2003. Vol. 49, No. 1. P. 114–152.
 8. Crauser, A., Mehlhorn, K., Meyer, U., Sanders, P. (1998). A parallelization of Dijkstra's shortest path algorithm. In: Brim, L., Gruska, J., Zlatuška, J. (eds) Mathematical Foundations of Computer Science 1998. MFCS 1998. Lecture Notes in Computer Science, vol 1450. Springer, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/BFb0055823>
-

INVESTIGATION OF PARALLEL APPLICATIONS FOR HETEROGENEOUS ARCHITECTURES USING THE SYCL AND OPENMP STANDARDS

O. Yu. Shamayeva¹ [0009-0006-3041-6682], A. M. Chernetsov² [0000-0001-7655-2395],
L. A. Zinchenko³ [0000-0002-2298-8721]

^{1, 2}*National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia*

³*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia*

¹ Shamayevaoy@mpei.ru, ² chernetsovam@mpei.ru, ³ lyudmilaaa@mail.ru

Abstract

The results of research on parallel applications for heterogeneous architectures using the SYCL standards and the DPC++ language, as well as OpenMP, developed by students of the Department of Applied Mathematics and Artificial Intelligence (AM&AI) at MPEI during research work are presented.

As an applied problem, the search for shortest paths in graphs of various dimensions using the Bellman–Ford and delta-step algorithms is considered. The impact of algorithm choice on the solution efficiency, as well as the heterogeneous multi-core architecture, is examined.

The Bellman-Ford algorithm is easily parallelized and demonstrated excellent scalability. In contrast, using a GPU for the delta-step algorithm did not provide significant speedup due to the complexity of memory coordination and the need to repeatedly copy data between devices. Testing was conducted using the following hardware: an Intel Core i5-12400F CPU (6 cores, 12 threads) and an NVIDIA GeForce GTX1660 GPU (1408 CUDA cores). The test results show that even within a single computational task, different implementations can exhibit different behavior when the task parameters are changed. This confirms the importance of preliminary analysis and testing when choosing a hardware&software architecture for tasks requiring high performance.

The developed software suite visualizes the dependence of parallel algorithm implementation speedup on the number of vertices in the graph for various method parameters and is successfully used in the educational and research processes of the AM&AI Department at MPEI.

Keywords: *heterogeneous architecture, the task of finding shortest paths in a graph, SYCL standard, DPC++ language, OpenMP technology.*

REFERENCES

1. SYCL 2020 Specification (revision 11).
URL: <https://registry.khronos.org/SYCL/specs/sycl-2020/html/sycl-2020.html> (date accessed: 12.05.2026)
2. SYCL Reference.
URL: https://github.khronos.org/SYCL_Reference/index.html (date accessed: 12.05.2026)
3. *Reinders James, Ashbaugh Ben, Brodman James, Kinsner Michael, Pennycook John, Tian Xinmin.* Data Parallel C++: Programming Accelerated Systems Using C++ and SYCL. Springer Nature, 2023. 630 p.
<https://doi.org/10.1007/978-1-4842-9691-2>
4. OpenMP standard. URL: <https://www.openmp.org> (date accessed: 12.05.2026)
5. *Robert Sedgewick.* Algorithms in C++: Graph algorithms Addison-Wesley, 2002, 496 p.
6. Algorithms: construction and analysis, 2nd edition. Translated from

English. Moscow: Williams Publishing House, 2011. 676 p.: ill. Parallel title English.

7. Meyer U., Sanders P. Δ -stepping: a parallelizable shortest path algorithm // J. of Algorithms. 2003. Vol. 49, No. 1. P. 114–152.

8. Crauser, A., Mehlhorn, K., Meyer, U., Sanders, P. (1998). A parallelization of Dijkstra's shortest path algorithm. In: Brim, L., Gruska, J., Zlatuška, J. (eds) Mathematical Foundations of Computer Science 1998. MFCS 1998. Lecture Notes in Computer Science, vol 1450. Springer, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/BFb0055823>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



ШАМАЕВА Ольга Юрьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры Прикладной математики и искусственного интеллекта Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва, Россия; область научных интересов: параллельные алгоритмы и параллельные вычисления.

Olga Yurevna SHAMAYEVA – Candidate of Sciences (Engineering), Associate professor, associate professor at the Department of Applied mathematics and Artificial Intelligence, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia; research interests: parallel algorithms and parallel computing.

email: Shamayevaoy@mpei.ru

ORCID: 0009-0006-3041-6682



ЧЕРНЕЦОВ Андрей Михайлович – кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры Прикладной математики и искусственного интеллекта Национального исследовательского университета «МЭИ».

Andrey Mikhailovich CHERNETSOV – candidate of Technical Sciences, Associate Professor; associate professor at the Department of Applied Mathematics and Artificial Intelligence, National Research University «Moscow Power Engineering Institute».

email: chernetsovam@mpei.ru

ORCID: 0000-0001-7655-2395



ЗИНЧЕНКО Людмила Анатольевна – доктор техн. наук, профессор, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Lyudmila Anatolyevna ZINCHENKO – Doctor of Technical Sciences, professor, Professor at the Department IU4, BMSTU.

email: lyudmillaa@mail.ru

ORCID: 0000-0002-2298-8721

Материал поступил в редакцию 25 мая 2026 года

ОРГАНИЗАЦИЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА В ИНЖЕНЕРНОМ ОБРАЗОВАНИИ НА БАЗЕ ВЕБ-ПЛАТФОРМЫ

В. В. Шаронов¹ [0009-0003-8020-8943], Т. Н. Абсатаров² [0009-0007-3651-5400],
М. В. Лукашевский³ [0000-0001-6782-6702], С. Д. Федорович⁴ [0000-0002-8986-7369]

¹ООО «Лабораториум», г. Бузулук, Россия

²⁻⁴Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

¹SharonovVV@mpei.ru, ²AbsatarovTN@mpei.ru, ³LukashevskyMV@mpei.ru,

⁴FedorovichSD@mpei.ru

Аннотация

Представлена отечественная веб-платформа ООО «Лабораториум» для проведения лабораторных работ на реальном экспериментальном оборудовании в дистанционном формате. Доступ к стенду реализован через стандартный браузер в рамках управляемых сеансов: обучающийся наблюдает за состоянием установки по видеопотоку, выполняет управляющие воздействия и автоматически формирует электронный протокол результатов. Преподаватель получает набор инструментов для назначения работ, планирования общей очереди доступа и проверки результатов на основе детальных журналов сеансов. Рассмотрены типовые сценарии использования платформы – как внутри отдельной образовательной организации, так и в сетевом межвузовском взаимодействии. Платформа проходит апробацию на кафедре общей физики и ядерного синтеза НИУ «МЭИ»; предварительные результаты оценены как положительные.

Ключевые слова: дистанционные лабораторные работы, инженерное образование, удаленный доступ к оборудованию, лабораторный стенд, веб-платформа, видеопоток, электронный протокол, межвузовское взаимодействие.

ВВЕДЕНИЕ

Подготовка инженерных кадров исторически связана с обязательным лабораторным практикумом, в ходе которого обучающиеся осваивают приемы об-

ращения с измерительной техникой, учатся обрабатывать полученные экспериментальные данные и следовать установленному порядку проведения опытов. Параллельно ужесточаются требования к доступности подобных занятий: численность академических групп растет, программы технических дисциплин усложняются, а возможности учебных лабораторий по времени работы и приборному парку остаются прежними или расширяются медленнее, чем растут общие потребности образовательного процесса.

В период 2020–2024 гг. в системе высшего образования получили широкое распространение программные симуляторы, виртуальные лаборатории, а также ряд локальных систем дистанционного управления отдельными стендами. Опыт их эксплуатации показал, что подобные инструменты эффективны для первичного знакомства студентов с методикой эксперимента и расширения охвата обучающихся, но в технических дисциплинах они, как правило, не позволяют сформировать полноценные навыки работы с реальной измерительной аппаратурой и характерными для нее погрешностями. Дополнительным ограничением выступает то, что узкоспециализированные программные продукты требуют постоянного технического сопровождения, плохо масштабируются между разными типами оборудования и редко распространяются за пределами конкретных кафедр или подразделения.

С учетом указанных недостатков обоснованным становится развитие лабораторного практикума, который опирается не на симуляционные модели, а на физически существующее оборудование и сопровождается понятным регламентом действий для обеих сторон образовательного процесса. Цель настоящей работы – представить опыт применения отечественной веб-платформы удаленного доступа к лабораторным установкам и проанализировать варианты ее использования при реализации образовательных программ в дистанционном формате.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Опыт проведения лабораторных работ по техническим дисциплинам в учебных лабораториях позволил выделить ряд устойчиво проявляющихся проблем организационно-методического характера, это

– жесткая географическая и временная привязка занятий к помещению лаборатории и сетке учебного расписания;

- ограниченная пропускная способность практикума, обусловленная не-большим числом установок и требованием физического присутствия студента на рабочем месте;

- затрудненность самостоятельного повторного выполнения эксперимента в удобное для обучающегося время, что снижает индивидуализацию образовательной траектории;

- отсутствие интегрированной цифровой среды, в которой объединены управление установкой, ведение электронного протокола и хранение журналов работы;

- разрозненность цифровизации (так называемая «лоскутная цифровизация») – локальные программные решения слабо тиражируемы между дисциплинами и не интегрируются между кафедрами и образовательными организациями.

Задачей настоящего исследования стало разработать программно-техническое решение, которое обеспечивает удаленное выполнение лабораторных работ на реальных стендах по формализованному регламенту сеанса и снижает организационную нагрузку на персонал лаборатории. Решение должно работать как внутри одного университета, так и в сетевом взаимодействии нескольких образовательных организаций при обмене доступом к стендам участников.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЛАТФОРМЫ

Техническое решение и его преимущества

Платформа реализована по схеме «браузер – сервер – локальный агент у стенда» (рис. 1). Пользователь работает с системой через веб-интерфейс; серверная часть отвечает за учет пользователей и ролей, расписание сеансов, хранение протоколов и журналов. Локальный агент размещен рядом с лабораторной установкой и обеспечивает обмен с оборудованием по промышленным интерфейсам (например, Modbus RTU), а также передачу видеопотока. Такое разделение позволяет использовать для работы только стандартный браузер, минимизировать вмешательство в существующие стенды и сохранять их в локальном контуре лаборатории. Блок-схема типового сценария выполнения лабораторной работы в системе представлена на рис. 2.

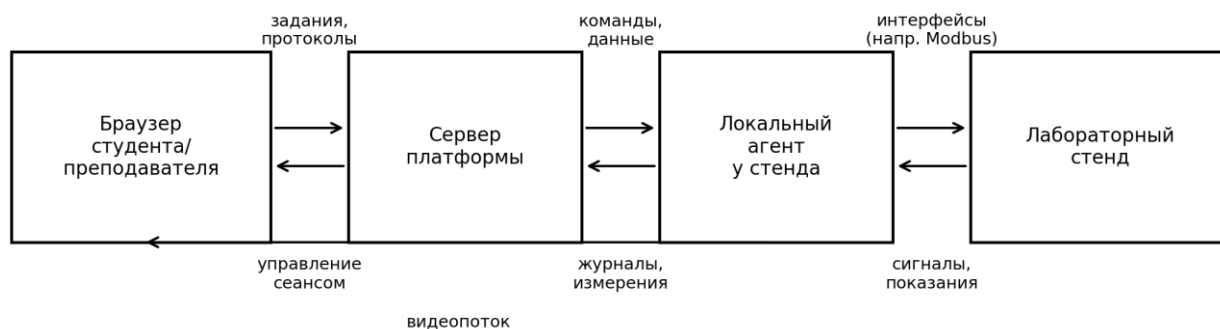


Рис. 1. Обобщенная схема взаимодействия компонентов платформы.



Рис. 2. Типовой сценарий выполнения лабораторной работы в системе.

Подключение новых установок выполняется по единому шаблону, что облегчает масштабирование практикума. Программное обеспечение разработано в Российской Федерации, правообладатель – ООО «Лабораториум»; решение ориентировано на выполнение требований импортозамещения и может развиваться в инфраструктуре образовательной организации.

Сценарий работы студента и преимущества

Студент проходит четкую последовательность шагов: вход в личный кабинет, выбор лабораторной работы и стенда, резервирование временного интервала, выполнение эксперимента в рамках сеанса и итоговое оформление протокола. Во время сеанса рабочая область интерфейса разделена на зоны: видео-окно с состоянием установки, панель текущих измеренных значений и элементы управления (рис. 3). Это позволяет студенту контролировать ход эксперимента, отслеживать изменения параметров и фиксировать промежуточные результаты в электронной форме.

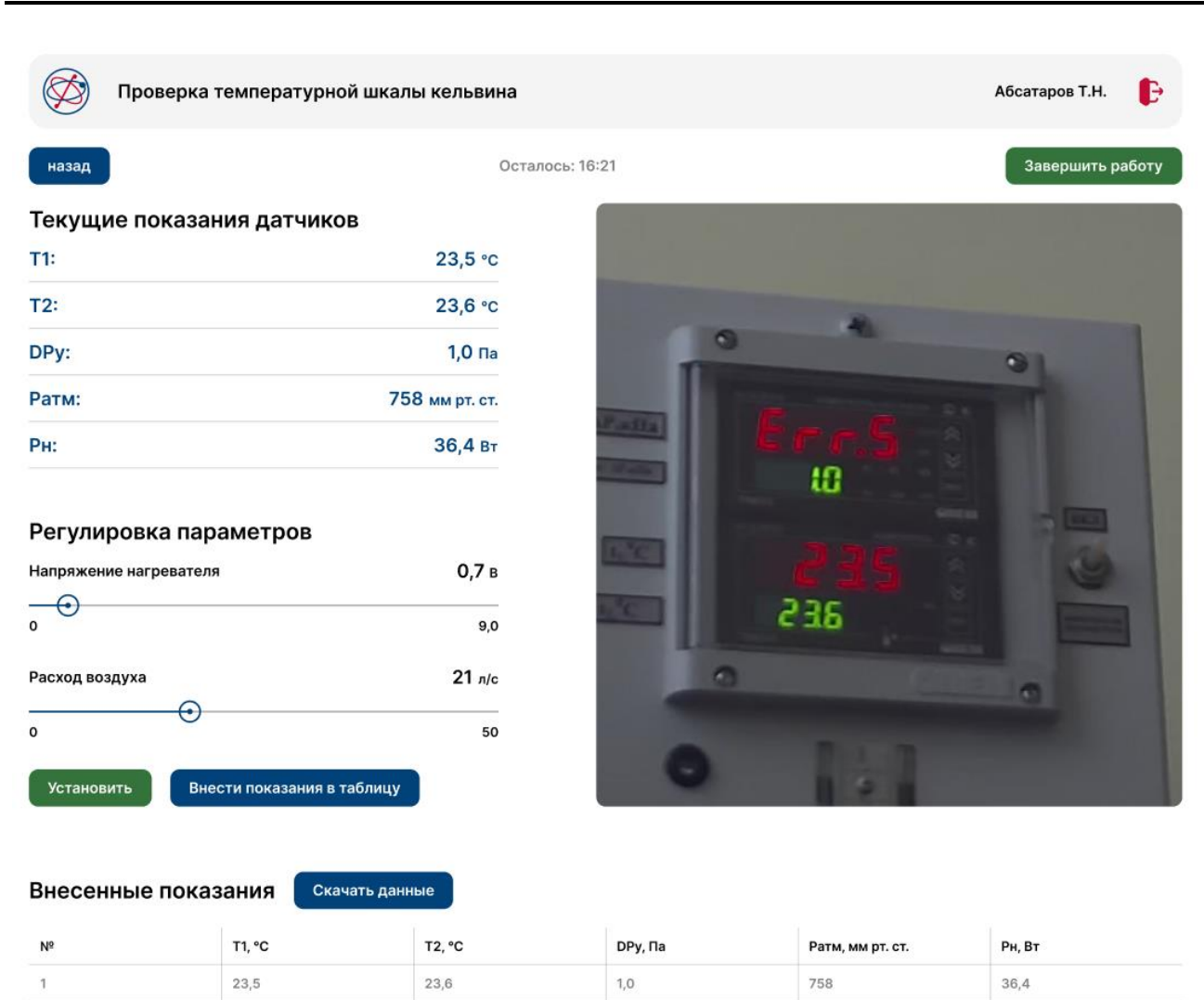
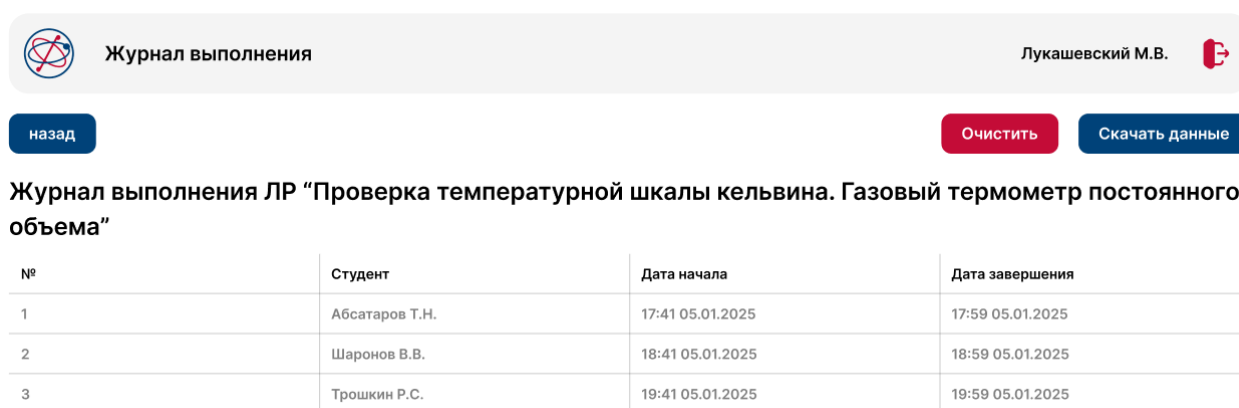


Рис. 3. Интерфейс рабочего места студента во время проведения эксперимента.

Практическая ценность подхода для обучающегося связана с возможностью повторять ключевые шаги эксперимента и анализировать ошибки на реальных данных, не ограничиваясь единственным очным занятием. Слотовая модель делает доступ к стенду прогнозируемым и снижает потери времени на ожидание. Дополнительно формируются навыки работы с реальными измерениями и погрешностями, что важно для подготовки инженера и последующей проектной деятельности.

Работа преподавателя и преимущества для учебного процесса

Преподаватель использует платформу как централизованный инструмент управления практикумом: назначает работы и индивидуальные допуски, выстраивает расписание сеансов и контролирует регламент эксперимента. Электронный протокол вместе с журналом действий студента (рис. 4) позволяет оценивать качество работы по итоговым числовым результатам и динамике их получения: временным отметкам, изменениям управляющих параметров, последовательности операций и реакции на нештатные ситуации. Такой подход облегчает организационную работу при росте числа обучающихся в группе или потоке, ускоряет цикл обратной связи и создает условия для формирования методического банка типовых ошибок и удачных решений, который в дальнейшем используется для совершенствования учебного курса.



№	Студент	Дата начала	Дата завершения
1	Абсатаров Т.Н.	17:41 05.01.2025	17:59 05.01.2025
2	Шаронов В.В.	18:41 05.01.2025	18:59 05.01.2025
3	Трошкин Р.С.	19:41 05.01.2025	19:59 05.01.2025

Рис. 4. Интерфейс преподавателя с журналом выполненных работ.

Преимущества для образовательной организации и межвузовское взаимодействие

Для образовательной организации внедрение платформы означает переход от использования стендов исключительно «внутри расписания» к режиму управляемого предоставления доступа в дистанционном формате. Помимо обеспечения собственных дисциплин лаборатория может участвовать в сетевых образовательных программах и совместных проектах с партнерскими вузами и учреждениями среднего профессионального образования, предоставляя доступ к отдельным установкам по согласованным регламентам и договорам. Контроль сеансов и хранение протоколов при этом выполняются средствами платформы.

При наличии спроса такой формат потенциально создает дополнительный источник дохода для образовательной организации. В практическом плане это формирует последовательный механизм: сначала обеспечивается дистанционный доступ к существующим стендам, затем по мере накопления опыта и ресурсов расширяется лабораторная база и, как следствие, возрастает объем доступной практики. Дополнительным эффектом может стать повышение узнаваемости лаборатории и привлекательности образовательной программы для абитуриентов.

Электронные симуляции и комбинированный формат обучения

Программные симуляторы и виртуальные лаборатории прочно вошли в практику подготовки студентов к очным занятиям: они доступны в любое время, безопасны для пользователя и оборудования, не изнашивают установки и допускают неограниченное число повторов опыта. Однако симуляционный эксперимент опирается на упрощенную математическую модель явления и не воспроизводит факторов натурной работы – случайных и систематических погрешностей, нестабильности режимов, влияния внешней среды, особенностей взаимодействия с физическими измерительными интерфейсами и средствами автоматизации. Это ограничивает прямой перенос навыков из виртуальной среды в инженерную практику.

Согласно метаанализу публикаций о применении виртуальных лабораторий в инженерном образовании, использование симуляционных средств дает статистически значимый положительный эффект: студенты, прошедшие подготовку на виртуальных лабораториях, в среднем показывают более высокие результаты, чем группы, обучавшиеся по традиционной методике [2]. Авторы этого исследования подчеркивают, что виртуальные лаборатории не заменяют очных занятий на физическом оборудовании и являются взаимодополняющим, а не альтернативным инструментом.

Удаленный доступ к натурным установкам продолжает эту линию развития практикума: он сохраняет масштабируемость виртуальных лабораторий и одновременно возвращает в учебный процесс опыт работы с физически измеренными данными. С учетом результатов [1] об эффективности активных методик обучения в удаленных лабораториях в дальнейшем развитии платформы ООО

«Лабораториум» предусмотрен комбинированный сценарий: предварительная отработка методики и интерфейса на симуляторе, затем выполнение ключевых измерительных операций на реальном стенде с автоматической фиксацией данных в едином электронном протоколе.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ

Апробация в условиях учебной лаборатории

Платформа проходит апробационные испытания совместно с кафедрой общей физики и ядерного синтеза НИУ «МЭИ» в условиях учебной лаборатории. Фотография внешнего вида одного из четырех имеющихся стендов представлена на рис. 5. На текущем этапе подтверждена работоспособность основных пользовательских сценариев: запуск сеанса по расписанию, видеонаблюдение, проведение измерений, формирование и передача электронного протокола. Сбор количественных показателей эксплуатации продолжается; предварительная обратная связь участников оценена как положительная.



Рис. 5. Пример лабораторного стенда «Определение показателя адиабаты воздуха», подключенного к платформе.

Контроль корректности и единый протокол результатов

В ходе сеанса в журнале фиксируются временные отметки, изменения управляющих параметров и экспериментальные данные. Это позволяет предпо-

давателю проверять корректность выполнения не только по итоговому протоколу, но и по последовательности действий. Наличие единого формата протокола упрощает сопоставление результатов между группами и дисциплинами и повышает воспроизводимость лабораторных работ.

Наблюдаемые эффекты и планируемая оценка

Предварительные результаты апробации показали снижение организационных трудозатрат и повышение прозрачности процесса: доступ планируется по слотам, результаты фиксируются автоматически. Поскольку испытания продолжаются, отмеченные эффекты носят предварительный характер. Количественная оценка формируется по данным журналов и опросов и включает показатели, привычные для инженерных экспериментов и учебной практики: количество проведенных сеансов, долю работ, завершенных без повторного допуска, среднее время выполнения (в минутах), среднее время ожидания доступа (в минутах), задержку видеоканала (в секундах), а также оценки удовлетворенности по пятибалльной шкале. Получение статистики позволит уточнить методические рекомендации и подготовить масштабирование на другие стенды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что применение отечественной платформы ООО «Лабораториум» позволяет организовать дистанционное выполнение лабораторных работ на реальном оборудовании по управляемому регламенту «сеанс – протокол – проверка». Трехзвенная архитектура «браузер – сервер – агент» обеспечивает минимальные требования к рабочему месту студента, сохраняя при этом оборудование в контуре лаборатории и облегчая подключение новых стендов. Отмечена возможность использования платформы в сетевых формах обучения и межвузовских проектах, что потенциально может способствовать развитию лабораторной базы. В настоящее время продолжаются апробационные испытания; предварительные результаты оценены как положительные. Дальнейшее развитие платформы предполагает расширение перечня поддерживаемых установок и внедрение комбинированного формата «симуляция + реальная установка».

Благодарности

Авторы выражают благодарность коллективу кафедры общей физики и ядерного синтеза НИУ «МЭИ» за содействие в проведении апробационных испытаний и предоставление доступа к лабораторной базе кафедры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Van den Beemt A., Groothuijsen S., Ozkan L., Hendrix W.* Remote labs in higher engineering education: engaging students with active learning pedagogy // *Journal of Computing in Higher Education*. 2023. Vol. 35. P. 320–340.
<https://doi.org/10.1007/s12528-022-09331-4>
2. *Li J., Liang W.* Effectiveness of virtual laboratory in engineering education: A meta-analysis // *PLOS ONE*. 2024. Vol. 19, No. 12. e0316269.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0316269>
3. *Hernandez-de-Menendez M., Vallejo Guevara A., Morales-Menendez R.* Virtual reality laboratories: a review of experiences // *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*. 2019. Vol. 13. P. 947–966.
<https://doi.org/10.1007/s12008-019-00558-7>
4. *May D., Terkowsky C., Varney V., Boehringer D.* Online laboratories in higher engineering education – solutions, challenges, and future directions from a pedagogical perspective // *European Journal of Engineering Education*. 2023. Vol. 48, No. 5. P. 759–768. <https://doi.org/10.1080/03043797.2023.2248819>
5. *Fedorovich S.D., Shcherbakov P.P., Lukashevsky M.V. et al.* The automated laboratory complex with remote access “Molecule physics and thermodynamics” // *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. Vol. 891. P. 012373.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/891/1/012373>

ORGANIZING A REMOTE LABORATORY PRACTICUM IN ENGINEERING EDUCATION ON A WEB PLATFORM

V. V. Sharonov¹ [0009-0003-8020-8943], T. N. Absatarov² [0009-0007-3651-5400],
M. V. Lukashevsky³ [0000-0001-6782-6702], S. D. Fedorovich⁴ [0000-0002-0034-9224]

¹Laboratorium LLC, Buzuluk, Russia

²⁻⁴National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia

¹SharonovVV@mpei.ru, ²AbsatarovTN@mpei.ru, ³LukashevskyMV@mpei.ru,

⁴FedorovichSD@mpei.ru

Abstract

The paper considers a domestic web platform by Laboratorium LLC intended for conducting laboratory works on real equipment in a remote format. Access to the laboratory stand is organized through a browser within managed sessions: the student observes the installation via a video stream, performs control actions, and generates an electronic protocol. The instructor is provided with tools for assigning works, scheduling the queue, and verifying protocols against execution logs. Usage scenarios of the platform and options for networked interaction between educational institutions are described. The platform is currently undergoing pilot testing; preliminary results are assessed as positive.

Keywords: *remote laboratory works, engineering education, remote access to equipment, laboratory stand, web platform, video stream, electronic protocol, inter-university interaction.*

REFERENCES

1. Van den Beemt A., Groothuijsen S., Ozkan L., Hendrix W. Remote labs in higher engineering education: engaging students with active learning pedagogy // Journal of Computing in Higher Education. 2023. Vol. 35. P. 320–340.
<https://doi.org/10.1007/s12528-022-09331-4>
2. Li J., Liang W. Effectiveness of virtual laboratory in engineering education: A meta-analysis // PLOS ONE. 2024. Vol. 19, No. 12. e0316269.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0316269>

3. *Hernandez-de-Menendez M., Vallejo Guevara A., Morales-Menendez R.* Virtual reality laboratories: a review of experiences // *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*. 2019. Vol. 13. P. 947–966.

<https://doi.org/10.1007/s12008-019-00558-7>

4. *May D., Terkowsky C., Varney V., Boehringer D.* Online laboratories in higher engineering education – solutions, challenges, and future directions from a pedagogical perspective // *European Journal of Engineering Education*. 2023. Vol. 48, No. 5. P. 759–768. <https://doi.org/10.1080/03043797.2023.2248819>

5. *Fedorovich S.D., Shcherbakov P.P., Lukashevsky M.V. et al.* The automated laboratory complex with remote access “Molecule physics and thermodynamics” // *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. Vol. 891. P. 012373.

<https://doi.org/10.1088/1742-6596/891/1/012373>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



ШАРОНОВ Владислав Витальевич – генеральный директор ООО «Лабораториум»; магистрант кафедры теоретических основ теплотехники имени М.П. Вукаловича Национального исследовательского университета «МЭИ».

Vladislav Vitalievich SHARONOV – Chief Executive Officer of Laboratorium LLC; Master's student at the M.P. Vukalovich Department of Theoretical Foundations of Heat Engineering, National Research University "Moscow Power Engineering Institute".

email: SharonovVV@mpei.ru

ORCID: 0009-0003-8020-8943



АБСАТАРОВ Тимирхан Нурбулатович – аспирант кафедры общей физики и ядерного синтеза, Национальный исследовательский университет «МЭИ».

Timirkhan Nurbulatovich ABSATAROV – PhD student at the Department of General Physics and Nuclear Fusion, National Research University "Moscow Power Engineering Institute".

email: AbsatarovTN@mpei.ru

ORCID: 0009-0007-3651-5400



ЛУКАШЕВСКИЙ Михаил Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры общей физики и ядерного синтеза, Национальный исследовательский университет «МЭИ».

Mikhail Vladimirovich LUKASHEVSKY – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of General Physics and Nuclear Fusion, National Research University "Moscow Power Engineering Institute".

email: LukashevskyMV@mpei.ru

ORCID: 0000-0001-6782-6702



ФЕДОРОВИЧ Сергей Дмитриевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры общей физики и ядерного синтеза Национального исследовательского университета «МЭИ».

Sergey Dmitrievich FEDOROVICH – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor at the Department of General Physics and Nuclear Fusion, National Research University “Moscow Power Engineering Institute”.

email: FedorovichSD@mpei.ru

ORCID: 0000-0002-8986-7369

Материал поступил в редакцию 3 июня 2026 года

ОНТОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПОЗНАВАНИЯ ЖЕСТОВ РУК ОПЕРАТОРА

М. В. Бобырь¹ [0000-0002-5400-6817], А. А. Асеев² [0009-0007-8271-7660]

^{1, 2}Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия

¹maxbobyrg@gmail.com, ²asseeff.artem@gmail.com

Аннотация

Представлена онтологическая модель распознавания жестов рук оператора, основанная на методе скелетизации кистей рук библиотеки MediaPipe Hands и авторском способе когнитивной трансформации состояний пальцев по ключевым точкам скелетизации в бинарный код с последующей его конвертацией в цифровой сигнал управления. Модель системы включает этапы предобработки видеокadra, скелетизации кисти, анализа координат ключевых точек, бинарного кодирования состояний пальцев и формирования итогового десятичного управляющего сигнала. Улучшение технических и методологических характеристик системы достигается за счет явного задания причинно-следственных связей между объектами и процессами в онтологии, а также применения четких правил бинарного кодирования. Разработанный интерфейс распознавания жестов обеспечивает точность 98% в нормальных условиях и не ниже 94% в условиях шума и низкой освещенности (50 лм и менее люкс) при среднем времени отклика 0.5 с, превосходя базовые методы на основе известных библиотек OpenCV и TensorFlow.

Ключевые слова: распознавание жестов, онтология, MediaPipe, алгоритм скелетизации, бинарный код, графический интерфейс, когнитивность.

ВВЕДЕНИЕ

Системы распознавания жестов обеспечивают интуитивное взаимодействие человека с машиной и находят применение в робототехнике, например в задачах дистанционного управления промышленными установками [1, 2]. Подобные системы позволяют передавать управляющие сигналы без использования традиционных устройств ввода, что особенно востребовано в условиях,

требующих бесконтактного взаимодействия. Подобные системы включают видеокамеру и персональный компьютер (ПК). Камера в режиме реального времени фиксирует жесты оператора и передает видеопоток на ПК, где выполняется обработка и формируется цифровой управляющий сигнал, например сигнал управления пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД)-регулятора [3]. Например, оператор жестом задает температуру в помещении, распознанный посредством видеокамеры сигнал поступает в ПК, который формирует сигнал управления ПИД-регулятора и обеспечивает поддержание заданной температуры в помещении. Однако практическая реализация такой системы сопряжена с рядом технических и методологических ограничений.

Так, существующие алгоритмы скелетизации кистей рук, реализованные в библиотеках MediaPipe Hands и TensorFlow [4, 5], используют и определяют только координаты ключевых точек на кадре. В связи с этим возникает задача когнитивной интерпретации полученных координат, т. е. задача сопоставления взаимного расположения точек реальным жестам (определение того, поднят палец или согнут) [6, 7]. Отмечено также, что традиционные решения на основе OpenCV менее устойчивы к шуму видеопотока [8], а системы на базе TensorFlow при высокой точности требуют значительных вычислительных ресурсов [9–11]. При этом проектирование системы без формализованного описания взаимосвязей компонентов порождает дополнительную сложность: инженеру необходимо точно знать, какие параметры и в каком месте управляющего программного кода требуется изменить при замене камеры или расширении набора жестов.

Перечисленные ограничения обусловили необходимость решения задачи разработки онтологической модели распознавания жестов рук оператора (ОМРЖРО). Онтология формализует состав системы (оператор, камера, ПК), типы сигналов, вычислительные и физические процессы, а также причинно-следственные связи между ними при заданной точности. На основе онтологической модели реализована двухуровневая система обработки информации. На первом уровне библиотека MediaPipe Hands [12–14] выполняет скелетизацию кистей рук. На втором уровне разработанный авторский алгоритм когнитивной интерпретации сопоставляет расположение ключевых точек скелетизации жестам,

преобразуя состояния пальцев в бинарный код, и формирует итоговое десятичное число для передачи на исполнительные устройства мехатронных комплексов. Например, жест «ОК» используется для интуитивно понятного подтверждения (фиксации) сформированного значения перед передачей его в систему управления.

ОНТОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПОЗНАВАНИЯ ЖЕСТОВ РУК ОПЕРАТОРА

Онтологическая модель (ОМ) распознавания жестов рук оператора организует структуру секелетизации жестов рук с помощью MediaPipe и интерпретацию в цифровые значения ключевых точек скелетизации с помощью авторского алгоритма. Организация достигается описанием взаимодействия между ее компонентами. ОМРЖРО задается в виде кортежа

$$O = \langle Oo_{i=1}^o, Op_{i=1}^p, Oi_{i=1}^i \rangle, \quad (1)$$

где Oo – ОМ классов объектов ($o = 1 \div 6$, где o – классы объектов); Op – ОМ процесса ($p = 1 \div 13$, где p – подклассы процесса); Oi – ОМ изображения ($i = 1 \div 11$, где i – атрибуты изображения). Модель определяет состав объектов системы, сигналов и процессы их преобразования (табл. 1), а также связи между ними (рис. 1).

Онтологическая модель (1) выделяет как физические объекты (камера, оператор, персональный компьютер), так и программные компоненты (MediaPipe, анализатор пальцев, графический интерфейс), реализующие вычислительные процессы обработки сигналов [15].

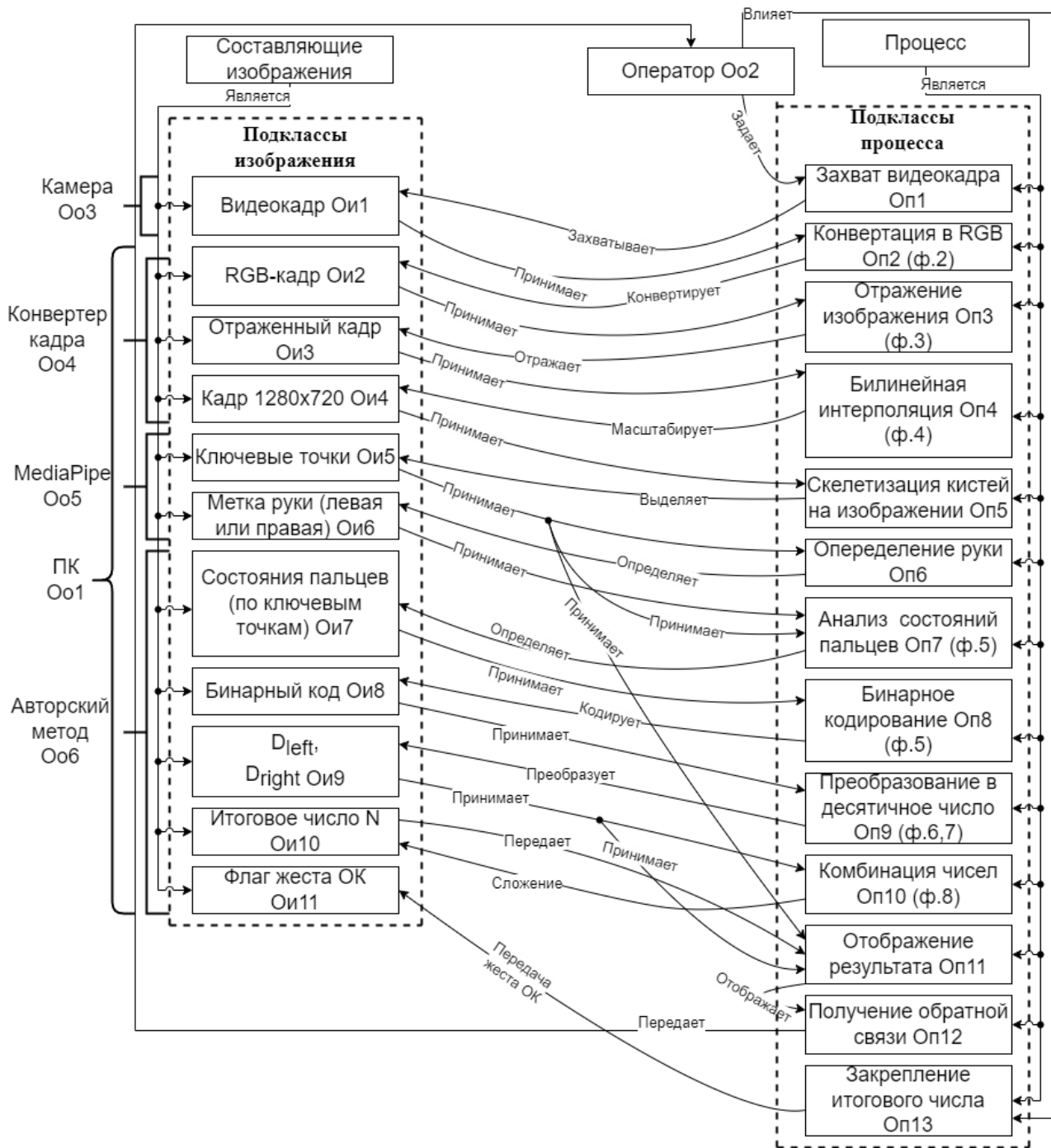


Рис. 1. Онтологическая модель распознавания жестов рук оператора.

Табл. 1. Онтология процессов, сигналов, объектов системы распознавания жестов рук оператора.

№	Процесс	Описание процесса	Атрибуты		Связанные объекты
			Входные сигналы	Выходные сигналы	
1	Захват видеокadra (ф. 2)	Получение кадра с камеры	–	Видеокادر	Камера, ПК
2	Конвертация в RGB (ф. 3)	Преобразование цветового пространства YUYV в RGB	Видеокادر	RGB-кадр	Конвертер кадра
3	Отражение изображения (ф. 3)	Горизонтальное отзеркаливание положения рук	RGB-кадр	Отраженный кадр	Конвертер кадра
4	Билинейная интерполяция (ф. 4)	Приведение кадра к разрешению 1280 x 720	RGB-кадр	Масштабированный кадр	Конвертер кадра
5	Скелетизация кистей (ф. 5)	Определение наличия рук и их ключевых точек	Масштабированный кадр	Ключевые точки	MediaPipe
6	Определение руки	Классификация обнаруженной руки (левая/правая)	Ключевые точки	Метка руки	MediaPipe
7	Анализ состояний пальцев	Сравнение координат кончиков и оснований пальцев	Ключевые точки, метка руки	Состояния пальцев	Авторский метод
8	Бинарное кодирование (ф. 6)	Объединение состояний пальцев в бинарную строку	Состояния пальцев	Бинарный код	Авторский метод
9	Преобразование в десятичное число (ф. 6, 7)	Конвертация бинарного кода в десятичное число (0–9)	Бинарный код	D_{left} или D_{right}	Авторский метод
10	Комбинация чисел (ф. 8)	Вычисление итогового числа N_{final}	$D_{\text{left}}, D_{\text{right}}$	Итоговое число N_{final}	Авторский метод
11	Отображение Результата (ф. 9)	Вывод итогового числа в графическом интерфейсе	Итоговое число N_{final}	отображается	Графический интерфейс
12	Получение обратной связи	Прием корректирующих данных от оператора	Действия оператора	Новые жесты	Графический интерфейс, Оператор

13	Подтверждение итогового числа	Использование жеста «ОК» для фиксации N_{final}	Жест опера- тора	Флаг жеста «ОК»	Графиче- ский интер- фейс, Опе- ратор
----	----------------------------------	--	---------------------	--------------------	--

Примечание. Обозначения ф. 1, ф. 2, ..., ф. 9 указывают на соответствующие формулы, представленные ниже.

На уровне физических объектов формируются визуальные сигналы, соответствующие реальному видеопотоку. Камера захватывает видеоряд, при этом формируется видеокадр, который поступает в вычислительную среду ПК. Далее система переходит на уровень цифровых объектов, реализованных внутри программного кода в ПК. Конвертер кадра выполняет преобразование цветового пространства изображения из YUV в RGB, отражает его, далее с помощью масштабирования кадр приводится к разрешению 1280 x 720. После предобработки кадра библиотека MediaPipe выполняет детекцию рук на нем, формируя координаты 21 ключевой точек (кончики и суставы пальцев), и определение руки (левая или правая), возвращая метку руки (D_{left} или D_{right}).

Наш метод кодирует состояния пальцев по их ключевым точкам в бинарный код. Далее двоичное значение каждой из рук конвертируется в десятичное число. На выходе онтологической модели формируется десятичное число за счет суммирования значений бинарных кодов левой и правой рук. При необходимости оператор подает сигнал обратной связи для калибровки параметров системы или фиксации итогового числа (рис. 1) [16, 17].

Таким образом, онтологическая модель распознавания жестов рук оператора предназначена для преобразования кадра, полученного с камеры, в итоговое десятичное значение при анализе расположения ключевых точек скелетизации. При этом каждая формула реализует конкретный онтологический процесс и использует сигналы, источники которых заданы в онтологии (табл. 1). Для реализации онтологической модели необходимо выполнить следующую последовательность шагов.

Шаг 1. Предобработка изображения

Захват видеопотока выполняется камерой и обеспечивает получение последовательности кадров. Выходной сигнал (видеокадр) представляет собой

изображение в формате YUYV, предоставляемом камерой, и преобразуется в RGB по формуле

$$I_{\text{RGB}}(x, y, c) = I_{\text{origin}}(x, y, 2 - c), \quad (2)$$

где (x, y) – координаты пикселя в выходном кадре ($0 \leq x < W$, $0 \leq y < H$), c – индекс цветового канала ($c = 0$ для красного, 1 – для зеленого, 2 – для синего цветов), I_{RGB} – результирующий RGB-кадр.

Таким образом, исходный синий канал ($c = 2$) становится красным, а красный ($c = 0$) – синим. Далее происходит горизонтальное «отзеркаливание» кадра. Это необходимо для корректной ориентации изображения, так как при фронтальной камере изображение отображается зеркально относительно реального положения рук оператора. Преобразование задается формулой

$$I_{\text{reflect}}(x, y) = I_{\text{RGB}}(W - 1 - x, y), \quad (3)$$

где I_{reflect} – отраженный кадр, W – ширина кадра в пикселях, x и y – целочисленные координаты пикселя ($0 \leq x < W$, $0 \leq y < H$, где H – высота кадра).

Масштабирование изменяет размер кадра до фиксированного разрешения (1280×720 пикселей) с сохранением пропорций. При использовании билинейной интерполяции преобразование задается формулой

$$I_{\text{scale}}(x', y') = \sum_{i=0}^{H-1} \sum_{j=0}^{W-1} I_{\text{RGB}}(i, j) \left(0, 1 - \left| i - y' \frac{H}{H'} \right| \right) \max \left(0, 1 - \left| j - x' \frac{W}{W'} \right| \right), \quad (4)$$

где H, W – высота и ширина исходного RGB-кадра, H', W' – целевая высота и ширина масштабированного кадра, (x', y') – координаты пикселя в выходном кадре ($0 \leq x' < W'$, $0 \leq y' < H'$), $I_{\text{RGB}}(i, j)$ – значение пикселя исходного кадра в строке i и столбце j .

Для областей, выходящих за пределы исходного изображения после масштабирования с сохранением пропорций, значение пикселей принимается равным нулю (черный цвет).

Шаг 2. Скелетизация рук и классификация, как левой или правой

Детекция рук на изображении реализуется библиотекой MediaPipe Hands. На вход подается масштабированный кадр I_{scale} , а на выходе формируются ключевые точки, представляющие собой массив трехмерных координат (x, y, z) для 21 ключевой точек каждой обнаруженной руки по формуле

$$O_{m,n,c} = \sum_{i=0}^{k-1} \sum_{j=0}^{k-1} \sum_{d=0}^{D-1} I_{scaled}(m+i, n+j, d) F_{i,j,d,c} + b_c, \quad (5)$$

где $O_{m,n,c}$ – значение выходного признака (карты признаков) в позиции (m, n) для канала c ; k – размер ядра свертки; D – число входных каналов (3 – для RGB); $F_{i,j,d,c}$ – веса фильтра; b_c – аддитивное смещение (bias).

Координаты распознанных ключевых точек нормированы относительно размеров кадра и глубины (рис. 2).

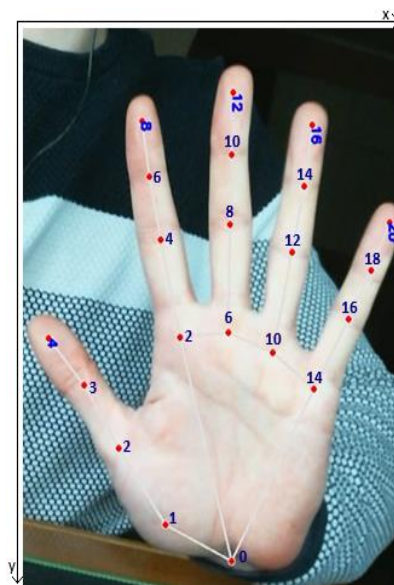


Рис. 2. Распознанные ключевые точки.

Далее выполняется анализ полученных ключевых точек и классификация обнаруженной руки, левой или правой. Эта информация необходима для корректной интерпретации жестов, поскольку для левой и правой рук правила определения поднятых пальцев различаются (для большого пальца знак сравнения по оси x инвертируется). Таким образом, выходной сигнал (метка руки) принимает значения “left” или “right”.

Шаг 3. Определение состояний пальцев

Когнитивная интерпретация жестов оператора основана на анализе взаимного расположения ключевых точек кисти, полученных с камеры. Состояние каждого пальца («поднят» – 1, «согнут» – 0) определяется по правилам, приведенным в табл. 2, где в качестве опорной точки используется сустав, идущий через одну позицию за кончиком пальца (индекс кончика i , индекс опоры $i - 2$). Для всех пальцев, кроме большого, сравнение выполняется по координате ординат y (вертикальное движение), для большого пальца – по координате абсцисс x (горизонтальное движение). Для левой руки правило большого пальца инвертируется в соответствии с формулой (3).

Табл. 2. Онтология процессов, сигналов, объектов системы распознавания жестов рук оператора.

Палец	Индексы точек (кончик / опора)	Правило для правой руки (1 – поднят)	Правило для левой руки (1 – поднят)
Большой	4 / 3	$x_{\text{кончик}} > x_{\text{опора}}$	$x_{\text{кончик}} < x_{\text{опора}}$
Указательный	8 / 6	$y_{\text{кончик}} < y_{\text{опора}}$	$y_{\text{кончик}} < y_{\text{опора}}$
Средний	12 / 10	$y_{\text{кончик}} < y_{\text{опора}}$	$y_{\text{кончик}} < y_{\text{опора}}$
Безымянный	16 / 14	$y_{\text{кончик}} < y_{\text{опора}}$	$y_{\text{кончик}} < y_{\text{опора}}$
Мизинец	20 / 18	$y_{\text{кончик}} < y_{\text{опора}}$	$y_{\text{кончик}} < y_{\text{опора}}$

Бинарный код жеста, соответствующий вектору состояний пальцев для одной руки S , определяется выражением

$$B = (S_{\text{thumb}}, S_{\text{index}}, S_{\text{middle}}, S_{\text{ring}}, S_{\text{pinky}}), \quad (6)$$

где S_{thumb} , S_{index} , S_{middle} , S_{ring} , S_{pinky} – бинарные состояния большого, указательного, среднего, безымянного пальцев и мизинца соответственно (1 – поднят, 0 – согнут).

Например, если подняты только безымянный палец и мизинец, а остальные согнуты, то для правой руки получим $B = (0, 0, 0, 1, 1)$, что соответствует бинарному коду 00011 и числу 3 в десятичной кодировке.

Шаг 4. Бинарно-десятичное преобразование числа

Преобразование бинарного кода B в десятичное число выполняется по формуле

$$D_{\text{raw}} = \sum_{j=0}^4 B_j 2^{(4-j)}, \quad (7)$$

где B_j – состояние j -го пальца из вектора B ; $j = 0$ соответствует большому пальцу ($2^4 = 16$), $j = 1$ – указательному (вес $2^3 = 8$), $j = 2$ – среднему ($2^2 = 4$), $j = 3$ – безымянному ($2^1 = 2$), $j = 4$ – мизинцу ($2^0 = 1$).

Полученное десятичное значение D находится в диапазоне от 0 до 31, $D_{\text{raw}} \in [0; 31]$. Для приведения к диапазону десятичных цифр от 0 до 9 используется ограничение

$$D = (D_{\text{raw}}, 9). \quad (8)$$

С учетом формул (6)÷(8) итоговое десятичное двузначное число N_{final} вычисляется по формуле

$$N_{\text{final}} = 10D_{\text{left}} + D_{\text{right}}, \quad (9)$$

Результат вычислений выводится на графический интерфейс, а также передается на систему управления ПИД-регулятором [3].

На первом шаге инициализации принимается $D_{\text{left}} = D_{\text{right}} = 0$. После каждого кадра интерпретация жестов, сформированных левой и правой руками (в соответствии с актуальными состояниями их пальцев), обновляется, обеспечивая работу системы в режиме реального времени и/или близком к нему.

Шаг 5. Человеко-машинный интерфейс

Итоговое десятичное число (N_{final}), определяемое по формуле (9), посредством графического интерфейса передаётся на вход ПИД-регулятора, устанавливая в законе управления требуемое значение (уставку), относительно которого вычисляется ошибка регулирования как разность между уставкой и текущим измеренным значением регулируемой величины. Интерфейс также отображает текущие состояния пальцев каждой руки, наглядно демонстрирует ске-

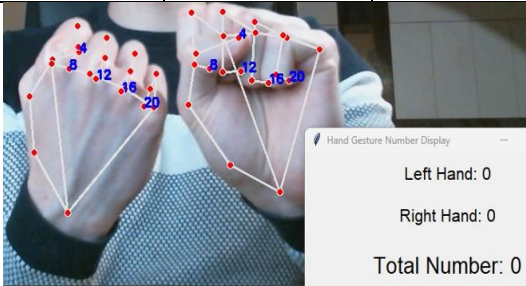
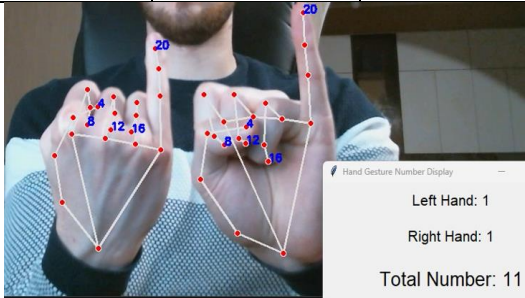
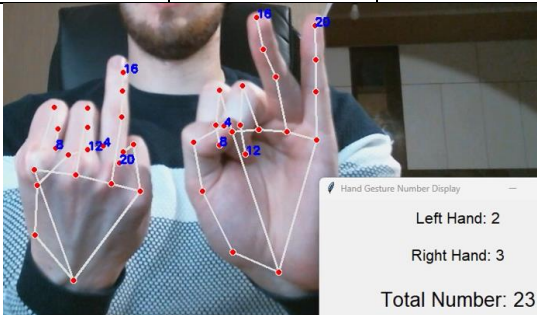
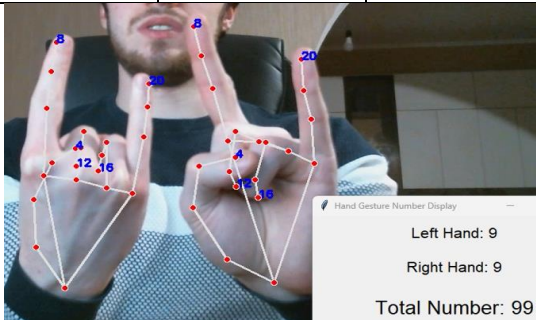
летизацию кистей и выводит состояние флага жеста «ОК». Использование данного жеста позволяет понятным человеку жестом зафиксировать/освободить значение итогового числа N_{final} .

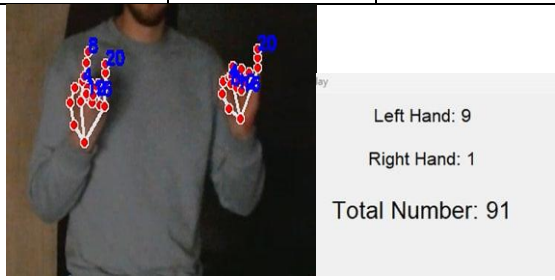
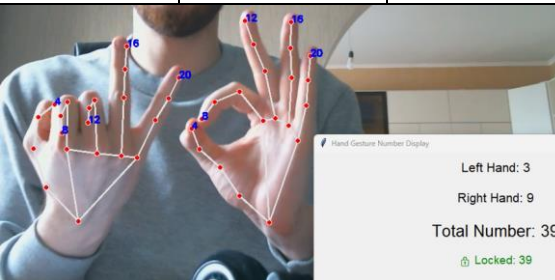
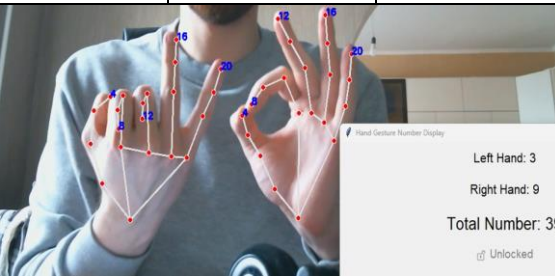
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОНТОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСПОЗНАВАНИЯ ЖЕСТОВ РУК ОПЕРАТОРА

Экспериментальные исследования выполнялись на персональном компьютере под управлением операционной системы Windows 11 с процессором Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2667 v4 @ 3,20 ГГц, оперативной памятью 48 Гб DDR4 и веб-камерой Logitech C615 (разрешение 1920×1080 FHD, угол обзора 78°, частота кадров 30 кадр./с).

В табл. 3 представлено соответствие между жестами, заданными оператором, и получаемыми выходными числами, определяемыми по формуле (9). Данная оценка осуществлялась визуально.

Табл. 3. Формирование числовых значений по жестам оператора.

№ эксп.	Жест (левая рука)	Жест (правая рука)	Номер	Жест (левая рука)	Жест (правая рука)	Номер
1	0	0	0	1	1	11
						
2	2	3	23	9	9	99
						

3	3	1	31	3	3	33
						
4	Жест (левая рука)	Жест (правая рука)	Номер	Жест (левая рука)	Жест (правая рука)	Номер
	8	1	81	9	1	91
						
5	3	9, «OK»	39 (Locked)	3	9, «OK»	39 (Unlocked)
						

В ходе исследования было выполнено пять экспериментов. Эксперименты 1 и 2 проводились в нормальных условиях освещения (лампа 80 Вт, освещенность около 300 люкс) при расстоянии от оператора до камеры 1.2 м. В ходе процесса оценивалось корректное формирование десятичных чисел для комбинаций жестов оператора. В общей сложности было выполнено 100 распознаваний для каждой пары чисел от 0 до 99. Система продемонстрировала устойчивое распознавание жестов с точностью 98%.

В эксперименте 3, проведенном в сложных условиях низкой освещенности (50 лк) и при увеличенном расстоянии до камеры (2 м), система сохранила точность 94%, что демонстрирует ее робастность.

В эксперименте 4 расстояние от оператора до камеры увеличивалось до тех пор, пока точность не опускалась ниже приемлемого порога. В хороших условиях освещения (лампа 80 Вт) граничное расстояние составило 4.2 м при точности около 70%. При неблагоприятном освещении (два LCD-монитора диагональю 27 дюймов: один яркостью 300 кд/м² с белым спектром изображения, второй яркостью 250 кд/м² с серым) максимальная дальность корректного распознавания снизилась до 2.8 м. Таким образом, качество освещения является важным фактором, определяющим рабочий диапазон дальности системы.

В эксперименте 5 проводилась проверка когнитивного восприятия системой жеста «ОК» для фиксации/освобождения итогового десятичного значения.

В каждом сценарии было проведено не менее 30 независимых испытаний для каждого жеста. Жестовый набор включал все комбинации поднятых пальцев для левой и правой рук (всего 100 возможных двузначных чисел от 0 до 99). Для каждого жеста регистрировались результаты распознавания.

Метрика точности

Для расчета показателей эффективности ключевой метрикой была выбрана точность распознавания жестов, которая вычислялась по формуле

$$\text{Точность} = \frac{\text{ПР}}{\text{ПР} + \text{ЛС} + \text{ОС}} \cdot 100\%, \quad (10)$$

где ПР (Правильное Распознавание) – количество правильно распознанных целевых жестов, ЛС (Ложное Распознавание) – количество ложных срабатываний (распознан жест, который не показывался), ОС (Отсутствие Срабатывания) – количество пропущенных целевых жестов.

Анализ экспериментальных результатов

На основе полученных данных и с учетом формулы (10) были рассчитаны ключевые показатели эффективности в сравнении с базовыми методами (OpenCV на основе контурного анализа и TensorFlow с предобученной моделью). Результаты представлены в табл. 4.

Табл. 4. Сравнительные характеристики систем распознавания жестов.

Параметр	ОМСРЖО	OpenCV	TensorFlow	Абсолютное улучшение ОМСРЖО vs TensorFlow
Точность (норм. усл.), %	98.0	88.0	95.0	+3.0
Точность (шум), %	95.5	80.0	88.0	+7.5
Точность (плохой свет), %	94.0	78.0	85.0	+9.0
Время отклика (норм. усл.), с	0.50	0.60	0.85	−0.35
Устойчивость к шуму (норм. усл.), %	−2.5	−8.0	−7.0	-

Система достигла средней точности распознавания 98 % в нормальных условиях. Количество ошибок распознавания росло в основном при расположении рук слишком близко к камере (< 0.5 м) или слишком далеко от нее (> 4.2 м), а также при недостаточном освещении (< 100 лк). Среднее время отклика составило 0.5 с, что позволяет использовать систему в реальном времени. Таким образом, результаты эксперимента подтверждают преимущество ОМСРЖО над OpenCV и TensorFlow, которое состоит в увеличении точности распознавания заданных жестов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана онтологическая модель преобразования жестов рук оператора в десятичный цифровой сигнал. В ее основе лежит когнитивный принцип сравнения относительного положения кончика пальца и его основания, что имитирует естественное для человека восприятие жеста. Кроме того, онтологическая модель формализует состав системы, типы сигналов и процессы, а также реализует вычислительную интерпретацию каждого из этих процессов. Алгоритмы определения состояний пальцев, бинарно-десятичного преобразования и комбинирования чисел от двух рук соответствуют конкретным онтологическим

процессам и используют строго определенные онтологические сигналы. Это обеспечивает сквозную прослеживаемость от физического объекта до получения итогового числа передающегося, например, на исполнительные устройства мехатронных комплексов.

Экспериментальные результаты подтверждают работоспособность предложенного подхода. Система достигла точности распознавания 98% в нормальных условиях и 94% при наличии шума и низкой освещенности. По точности и времени отклика полученные показатели превосходят решения на базе OpenCV и TensorFlow. Результаты свидетельствуют о перспективности онтологического подхода для проектирования и формализации сложных систем распознавания образов в реальном времени.

Вместе с тем реализованная онтологическая модель имеет ряд ограничений, определяющих направления будущих исследований. Алгоритм скелетизации MediaPipe испытывает затруднения при корректном определении положения большого пальца, поскольку его движение происходит в горизонтальной плоскости, а не в вертикальной, что в некоторых случаях приводит к ошибкам кодирования расположения ключевых точек на кисти руки. Шум видеопотока и недостаточная освещенность (50 лк и менее) снижают точность распознавания. Для устранения перечисленных ограничений планируется усовершенствование базы нечетко-логических правил в процессе обработки распознанных ключевых точек.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию № 075-03-2026-489.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кумашев Э., Аминов Н.С. Распознавание жестов в умном доме // XII Конгресс молодых ученых: сборник научных трудов. СПб.: Университет ИТМО, 2023. С. 201–211.
2. Ефремов А.В., Муратов Е.Р., Никифоров М.Б., Хутев А.Н. Распознавание жестов в бесконтактном управлении робототехническими системами //

Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы – Биомедсистемы-2022: сборник трудов XXXV Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Рязань: ИП Коняхин А.В., 2022. С. 446–448.

3. Бобырь М.В., Милостная Н.А., Ноливос К.А. Комбинация нечетко-цифрового фильтра и ПИД регулятора в задаче управления термоэлементом // Мехатроника, автоматизация, управление. 2022. Том 23. С. 473-480.

<https://doi.org/10.17587/mau.23.473-480>

4. Саттарова В.В., Хачумов М.В. Сравнительный анализ методов машинного обучения в задаче распознавания жестов рук // Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем: материалы Всероссийской конференции с международным участием. Москва: РУДН им. П. Лумумбы, 2024. С. 221–226.

5. Куликова Э.В. Алгоритм распознавания жестов русского жестового языка на видео // Заметки по информатике и математике: сборник научных статей. Вып. 15. Ярославль: ЯрГУ им. П.Г. Демидова, 2023. С. 41–50.

6. Althubiti A.H., Algethami H. Gesture Recognition Using Deep Learning Algorithms: A Comparative Study // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2024. Vol. 15, No. 6.

7. Bhujbal P.S., Kotmale M., Kadam N., Magar M., Barakade K. Sign Observation and Understanding Language (SOUL) // International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology. 2024. Vol. 09, Issue 5. P. 135–139.

<https://doi.org/10.33564/ijeast.2024.v09i05.016>

8. Dhamodaran S., Phukan P.P., Singh M., Nandakum Sh. Implementation of Hand Gesture Recognition Using OpenCV // International Journal of Research Publication and Reviews. 2024. Vol. 5, No. 5. P. 8039–8050.

<https://doi.org/10.55248/gengpi.5.0524.1324>

9. Han Lin H.Ye., Murli N. BIM Sign Language Translator Using Machine Learning (TensorFlow) // Journal of Soft Computing and Data Mining. 2022. Vol. 3, No. 1. <https://doi.org/10.30880/jscdm.2022.03.01.007>

10. Muhammad M.A., Martinus M., Nurhartanto A., Mulyani Ye., Djausal G.P., Achmad D., Ferbangkara S. Development of Lampung Script Characters

Recognition Model Using TensorFlow // International Journal of Electronics and Communications Systems. 2023. Vol. 3, No. 2. P. 97.

<https://doi.org/10.24042/ijecs.v3i2.19878>

11. Controlling Websites Through Hand Gestures Using TensorFlow JS and Browser Extension // International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science. 2023. <https://doi.org/10.56726/irjmets34907>

12. *Kocakulak M., Acir N.* A Contactless Palmprint Imaging System Design Using MediaPipe Hands // Journal of Innovative Science and Engineering (JISE). 2022. <https://doi.org/10.38088/jise.1142634>

13. *Song R., Hong Yu., Kwak N.* User Interface Using Hand Gesture Recognition Based on MediaPipe Hands Model // Journal of Korea Multimedia Society. 2023. Vol. 26, No. 2. P. 103–115. <https://doi.org/10.9717/kmms.2023.26.2.103>

14. *Pati R.N., Vallabhaneni N., P P., Shekhawat Ya., Paria S.* Real-Time Computer Vision Based Hand Gesture Recognition // International Research Journal on Advanced Science Hub. 2023. Vol. 5, Issue 05S. P. 382–391. <https://doi.org/10.47392/irjash.2023.s052>

15. *Grebeshkov A., Shebalov R., Gorshkov S., Mushtak O.* Ontological modeling of enterprises: technologies and methods // Book, TriniData LLC & Ural Federal University. 2019. P. 104–116. ISBN: 978-5-7996-2580-1.

16. *Бобырь М.В., Асеев А.А.* Программа управления жестами рук с вводом числовых команд на основе библиотеки MediaPipe. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026616114. Дата регистрации: 04.03.2026.

17. *Бобырь М.В., Асеев А.А.* Программа для анализа жестов рук и выделения ключевых точек на основе библиотек MediaPipe и TensorFlow. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026616251. Дата регистрации: 05.03.2026.

ONTOLOGICAL MODEL FOR OPERATOR HAND GESTURE RECOGNITION

M. V. Bobyr¹ [0000-0002-5400-6817], A. A. Aseev² [0009-0007-8271-7660]

^{1, 2}*Southwest State University, Kursk, Russia*

¹maxbobyr@gmail.com, ²asseeff.artem@gmail.com

Abstract

The article presents an ontological model for operator hand gesture recognition based on hand skeletonization using the MediaPipe Hands library and an original method for cognitive transformation of finger states from skeleton keypoints into binary code with its subsequent conversion into a digital control signal. Improvement in the technical and methodological characteristics of the system is achieved through explicit definition of cause-and-effect relationships between objects and processes within the ontology, as well as the application of clear binary encoding rules. The mathematical model of the system includes the following stages: video frame preprocessing, hand skeletonization, coordinate analysis of keypoints, binary encoding of finger states, and generation of the final decimal control signal. The developed gesture recognition interface ensures an accuracy of 98% under normal conditions and no less than 94% under noisy and low-light conditions (50 lux or less), with an average response time of 0.5 seconds, outperforming baseline methods based on widely used libraries such as OpenCV and TensorFlow.

Keywords: *gesture recognition, ontology, MediaPipe, skeletonization algorithm, binary code, graphical user interface, cognitivity.*

Acknowledgements

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education under State Contract No. 075-03-2026-489.

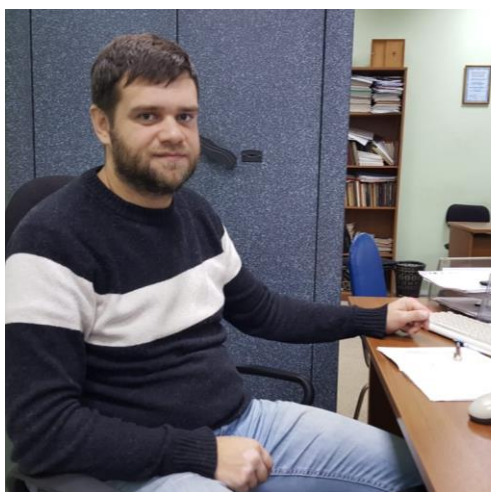
REFERENCES

1. Kumashev E., Aminov N.S. Gesture Recognition in a Smart Home // XII Congress of Young Scientists: Collection of Scientific Papers. St. Petersburg: ITMO University, 2023. P. 201–211.

2. *Efremov A.V., Muratov E.R., Nikiforov M.B., Khutiev A.N.* Gesture Recognition in Contactless Control of Robotic Systems // Biotechnical, Medical and Environmental Systems, Measuring Devices and Robotic Complexes – Biomedsystems-2022: Proceedings of the XXXV All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Young Scientists and Specialists. Ryazan: IP Konyakhin A.V., 2022. P. 446–448.
3. *Bobyr M., Milostnaya N., Nolvos C.* PID Regulator and Fuzzy-Digital filter combination in a thermoelement control task // Mechatronics, Automation, Control. 2022. Vol. 23. P. 473–480. <https://doi.org/10.17587/mau.23.473-480>
4. *Sattarova V.V., Khachumov M.V.* Comparative Analysis of Machine Learning Methods in the Task of Hand Gesture Recognition // Information and Telecommunication Technologies and Mathematical Modeling of High-Tech Systems: Proceedings of the All-Russian Conference with International Participation. Moscow: RUDN University named after P. Lumumba, 2024. P. 221–226.
5. *Kulikova E.V.* Algorithm for Recognizing Russian Sign Language Gestures in Video // Notes on Informatics and Mathematics: Collection of Scientific Articles. Issue 15. Yaroslavl: Yaroslavl State University named after P.G. Demidov, 2023. P. 41–50.
6. *Althubiti A.H., Algethami H.* Gesture Recognition Using Deep Learning Algorithms: A Comparative Study // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2024. Vol. 15, No. 6.
7. *Bhujbal P.S., Kotmale M., Kadam N., Magar M., Barakade K.* Sign Observation and Understanding Language (SOUL) // International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology. 2024. Vol. 09, Issue 5. P. 135–139. <https://doi.org/10.33564/ijeast.2024.v09i05.016>
8. *Dhamodaran S., Phukan P.P., Singh M., Nandakum Sh.* Implementation of Hand Gesture Recognition Using OpenCV // International Journal of Research Publication and Reviews. 2024. Vol. 5, No. 5. P. 8039–8050. <https://doi.org/10.55248/gengpi.5.0524.1324>
9. *Han Lin H.Ye., Murli N.* BIM Sign Language Translator Using Machine Learning (TensorFlow) // Journal of Soft Computing and Data Mining. 2022. Vol. 3, No. 1. <https://doi.org/10.30880/jscdm.2022.03.01.007>

10. *Muhammad M.A., Martinus M., Nurhartanto A., Mulyani Ye., Djausal G.P., Achmad D., Ferbangkara S.* Development of Lampung Script Characters Recognition Model Using TensorFlow // International Journal of Electronics and Communications Systems. 2023. Vol. 3, No. 2. P. 97.
<https://doi.org/10.24042/ijecs.v3i2.19878>
11. *Outanoute M.*, Controlling Websites Through Hand Gestures Using TensorFlow JS and Browser Extension // International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science. 2023.
<https://doi.org/10.56726/irjmets34907>
12. *Kocakulak M., Acir N.* A Contactless Palmprint Imaging System Design Using MediaPipe Hands // Journal of Innovative Science and Engineering (JISE). 2022.
<https://doi.org/10.38088/jise.1142634>
13. *Song R., Hong Yu., Kwak N.* User Interface Using Hand Gesture Recognition Based on MediaPipe Hands Model // Journal of Korea Multimedia Society. 2023. Vol. 26, No. 2. P. 103–115. <https://doi.org/10.9717/kmms.2023.26.2.103>
14. *Pati R.N., Vallabhaneni N., P P., Shekhawat Ya., Paria S.* Real-Time Computer Vision Based Hand Gesture Recognition // International Research Journal on Advanced Science Hub. 2023. Vol. 5, Issue 05S. P. 382–391.
<https://doi.org/10.47392/irjash.2023.s052>
15. *Grebeskov A., Shebalov R., Gorshkov S., Mushtak O.* Ontological modeling of enterprises: technologies and methods // Book, TriniData LLC & Ural Federal University. 2019. P. 104–116. ISBN: 978-5-7996-2580-1.
16. *Boby M.V., Aseev A.A.* Program for Hand Gesture Control with Numerical Command Input Based on the MediaPipe Library. Certificate of State Registration of Computer Program No. 2026616114. Registration date: March 4, 2026.
17. *Boby M.V., Aseev A.A.* Program for Hand Gesture Analysis and Key Point Extraction Based on MediaPipe and TensorFlow Libraries. Certificate of State Registration of Computer Program No. 2026616251. Registration date: March 5, 2026.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



БОБЫРЬ Максим Владимирович – 1978 года рождения, учился в Курском государственном техническом университете (ныне – Юго-Западный государственный университет). В 2012 году защитил диссертацию на соискание доктора технических наук по специальности 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами». В настоящее время работает профессором на кафедре программной инженерии. Является председателем диссертационного совета по специальности 5.12.4 «Когнитивное моделирование».

Область научных интересов: адаптивные нейронечеткие системы вывода, цифровая обработка изображений и распознавание образов, машинное обучение, стереозрение.

Maksim Vladimirovich BOBYR – born in 1978, studied at Kursk State Technical University (now Southwest State University). In 2012, he defended his dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.13.06 Automation and Control of Technological Processes and Production. Currently, he works as a professor at the Department of Software Engineering. He is the chairman of the dissertation council for specialty 5.12.4 Cognitive Modeling.

Research interests: adaptive neuro-fuzzy inference systems, digital image processing and pattern recognition, machine learning, stereo vision.

email: maxboby@gmail.com

ORCID: 0000-0002-5400-6817



АСЕЕВ Артем Андреевич – 1999 года рождения, учится на 3 курсе аспирантуры Юго-Западного государственного университета на кафедре программной инженерии по специальности 2.3.3 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами. Область научных интересов: адаптивные нейро-нечеткие системы вывода, распознавание образов.

Artem Andreevich ASEEV – born in 1999, a 3th-year postgraduate student at the Southwest State University, Department of Software Engineering, specialty 2.3.3 Automation and Control of Technological Processes and Production. Research interests: adaptive neuro-fuzzy inference systems, pattern recognition.

email: asseeff.artem@gmail.com

ORCID: 0009-0007-8271-7660

Материал поступил в редакцию 22 апреля 2026 года

НЕЧЕТКО-ЛОГИЧЕСКАЯ АДАПТАЦИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ИЗБИРАТЕЛЬНОСТИ ДЕКОДИРОВАНИЯ ПРИ АВТОРЕГРЕССИОННОЙ ГЕНЕРАЦИИ ТЕКСТА ЯЗЫКОВЫМИ МОДЕЛЯМИ

М. В. Бобырь¹ [0000-0002-5400-6817], Н. А. Милостная² [0000-0002-3779-9165],
С. Ю. Бельская³ [0009-0000-2013-9972]

¹⁻³ Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия

¹maxbobyrgmail.com, ²nat_mil@mail.ru, ³s@belskaia.ru

Аннотация

При авторегрессионной генерации текста языковыми моделями (LLM) выбор следующего токена выполняется функцией Softmax с фиксированным коэффициентом декодирования, равным единице и одинаковым для всех шагов генерации и типов текста. Такой подход не учитывает динамически изменяющиеся лингвистические характеристики формируемого контекста. Например, текст с высоким лексическим разнообразием нуждается в высокой избирательности: значение коэффициента декодирования должно быть малым. Монотонный повторяющийся контекст требует сглаживания распределения: значение коэффициента декодирования должно быть большим.

Предложен нечеткий регулятор вычисления коэффициента избирательности декодирования, построенный с использованием двух лингвистических признаков, а именно лексического разнообразия сформированного контекста и энтропии Шеннона распределения вероятностей на предшествующем шаге. Нечеткий регулятор реализован на алгоритме Мамдани с базой из девяти нечетко-логических правил и дефаззификатором на основе метода центра тяжести. Эффективность предложенного подхода заключается в том, что для терминологически насыщенного текста нечеткий регулятор снижает энтропию Шеннона распределения вероятностей более чем в 20 раз по сравнению со стандартным подходом.

Ключевые слова: нечеткий вывод, алгоритм Мамдани, авторегрессионная генерация, Softmax, LLM, коэффициент избирательности, TTR, энтропия вероятностей, GPT.

ВВЕДЕНИЕ

Большие языковые модели (Large Language Models, LLM) типа GPT-2, GPT-4, LLaMA и Mistral генерируют текст методом авторегрессионного декодирования, т. е. на каждом шаге модель предсказывает вероятностное распределение над словарем (50257 токенов в GPT-2) и выбирает следующий токен согласно этому распределению [1, 2]. Основной вычислительной операцией для реализации этого процесса является функция Softmax, преобразующая логиты модели в вероятности по формуле

$$p(v) = \frac{\exp\left(\frac{L[v]}{\beta^*}\right)}{\sum_j \exp\left(\frac{L[j]}{\beta^*}\right)},$$

где $L[v]$ – логит токена из словаря v ; β^* – коэффициент избирательности декодирования.

В стандартной реализации функции авторегрессионной генерации текста [3] значение коэффициента избирательности декодирования эквивалентно единице ($\beta^* = 1.0$) и фиксировано для всех шагов генерации и типов текста. Такой подход игнорирует неоднородность генерируемого контекста.

На практике различные типы генерируемого контекста предъявляют принципиально разные требования к избирательности декодирования. Для научного текста с высокой терминологической насыщенностью предпочтительно малое значение коэффициента декодирования β^* , обеспечивающее острое вероятностное распределение. В этом режиме языковая модель концентрирует вероятностную массу на наиболее релевантном токене-продолжении, что соответствует детерминированному режиму генерации. Для монотонного повторяющегося контекста стандартное значение, равное единице ($\beta^* = 1.0$), не препятствует циклическому воспроизведению одних и тех же шаблонных конструкций. Распределение вероятностей в таких условиях устойчиво концентрируется на ограниченном наборе токенов, что снижает информационное разнообразие генерируемого текста. Увеличение значения коэффициента декодирования сглаживает распределение, расширяя эффективное пространство кандидатов и стимулируя лексическое разнообразие.

Нечеткая логика [4] предоставляет математический аппарат для работы с лингвистическими переменными, не имеющими точных числовых границ. Алгоритм Мамдани [5] позволяет построить нечеткий регулятор на основе правил вида «ЕСЛИ...ТО...», формализующих экспертные знания о связи характеристик контекста и оптимального значения коэффициента избирательности декодирования. Нами ранее были разработаны нечетко-логические методы адаптации параметров скользящего окна при подготовке обучающих данных [6] и коэффициента масштабирования в механизме многоголового внимания [7]. Настоящая работа завершает этот цикл исследований, распространяя нечетко-логический подход на третий этап функционирования языковой модели. Этим этапом является авторегрессионное декодирование.

Минимизация энтропии вероятностного распределения при декодировании имеет прямую связь с качеством процесса принятия решений языковой моделью. Высокая энтропия свидетельствует о равномерном распределении вероятностной массы по большому числу токенов-кандидатов, что соответствует состоянию неопределенности, при котором модель не отдает предпочтения ни одному из вариантов продолжения. В условиях жадного декодирования это не сказывается на финальном выборе, однако при стохастических стратегиях высокая энтропия увеличивает вероятность выбора семантически нерелевантного токена, снижая связность и тематическую согласованность генерируемого текста.

Целенаправленное снижение энтропии через адаптацию коэффициента декодирования концентрирует вероятностную массу на семантически значимых токенах, повышая детерминированность генерации в контекстах, где это лингвистически обосновано. С точки зрения теории информации распределение с минимальной энтропией является дискретным аналогом дельта-функции Дирака. При таком распределении вся вероятностная масса сосредоточена в одной точке, что соответствует состоянию максимальной определенности системы при принятии решения о следующем токене. Предложенный нечетко-логический регулятор обеспечивает адаптивное управление этой характеристикой в зависимости от лингвистических свойств контекста, не требуя ни дополнительного обучения модели, ни изменения ее архитектуры.

Цель настоящей работы – разработка метода нечетко-логической адаптации коэффициента избирательности декодирования, обеспечивающего минимизацию энтропии Шеннона вероятностного распределения при генерации терминологически насыщенного текста и управляемое расширение этого распределения для монотонного контекста.

Научная новизна работы заключается в следующем. Адаптация коэффициента избирательности декодирования β^* впервые сформулирована как задача нечеткого управления. В качестве лингвистических входных переменных предложены лексическое разнообразие сформированного контекста D и энтропия Шеннона H вероятностного распределения на предшествующем шаге генерации. Разработана база из девяти нечетко-логических правил с когнитивно-лингвистической интерпретацией. Впервые показано, что предложенный метод обеспечивает снижение энтропии декодирования более чем в 20 раз для терминологически насыщенного текста по сравнению со стандартным значением, эквивалентным единице. Исследована временная динамика коэффициента декодирования по итерациям авторегрессионной генерации с замкнутой обратной связью через признак H .

Следует отметить, что работа является логическим продолжением двух наших, ранее опубликованных статей [6, 7]. Для понимания вклада настоящей работы важно четко обозначить отличия, предложенные в ней (табл. 1).

Табл. 1. Сравнение трех нечетко-логических методов адаптации языковых моделей.

Характеристика	Статья [6] Скользящее окно	Статья [7] Коэффициент внимания	Представленная Статья Коэффициент декодирования
Этап цикла работы языковой модели	Подготовка данных (до обучения)	Механизм внимания (при обработке)	Декодирование (при генерации)
Адаптируемый параметр	stride, max_length	τ^* (коэффициент Softmax в МНА)	β^* (коэффициент избирательности)

Входной признак 1 (D)	TTR входного фрагмента	TTR входного фрагмента	TTR сгенерированного контекста
Входной признак 2 (H)	avg_len (средняя длина токена)	Энтропия весов внимания	Энтропия вероятностей (предыдущий шаг)
Диапазон выхода	stride: [25, 231] max_length: [52, 462]	$\tau^* \in [0.5, 3.0]$	$\beta^* \in [0.3, 2.5]$
Стандартное значение	stride=128, max_length=256	$\tau^* = \sqrt{d_k} \approx 1.41$	$\beta^* = 1.0$
Временная динамика	Нет (по фрагментам)	Нет (по фрагментам)	Да — по итерациям генерации (ключевое отличие)
Обратная связь	Нет	Нет	Да — H зависит от β^* предыдущего шага
Когнитивная интерпретация	Внимательное vs быстрое чтение	Концентрация vs рассеивание внимания МНА	Точный vs творческий режим генерации

Из табл. 1 видно, что ключевым отличием, предложенным в данной статье, является наличие временной динамики, поскольку в [6, 7] нечеткий регулятор применяется независимо к каждому фрагменту. Ниже коэффициент избирательности декодирования адаптируется на каждом шаге итеративной генерации, при этом H на шаге i зависит от β^* на шаге $i-1$. При этом формируется замкнутая система с обратной связью. Это принципиально новый аспект, не рассматривавшийся в [6, 7].

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА

1. Входные лингвистические переменные

Для построения нечеткого регулятора для вычисления коэффициента β^* выбраны два входных признака, вычисляемых автоматически на каждом шаге генерации.

Признак D – лексическое разнообразие сгенерированного контекста (TTR, Type-Token Ratio). Вычисляется по последним N токенам выходной последовательности с помощью формулы

$$D = \frac{|\{\text{уникальные } ID \text{ токенов}\}|}{|\{\text{все } ID \text{ токенов}\}|} \in [0, 1].$$

Параметр D вычисляется по уже сгенерированному тексту (выходу), а не по входному фрагменту. Если $D \rightarrow 1$, то это означает, что контекст является разнообразным, нужна высокая избирательность. Если $D \rightarrow 0$, то это означает повторяющийся контекст, необходимо сглаживание. Пусть задан текст “Every effort moves you toward”. Тогда Токены: [“Every”, “effort”, “moves”, “you”, “toward”].

ID: [6109, 3626, 6100, 345, 1403], Уникальных: 5, всего: 5. $D = 5/5 = 1$.

Признак H – нормированная энтропия Шеннона распределения вероятностей на шаге $i-1$:

$$H = -\frac{\sum_j p(j) \ln p(j)}{\ln |V|} \in [0, 1],$$

где $p(j)$ – вероятность появления токена j на предыдущем шаге генерации, $|V| = 50257$.

Признак H вычисляется по распределению вероятностей декодирования probas, а не по весам внимания многоголового механизма внимания (МНА). Если $H \rightarrow 0$, то языковая модель была уверена на прошлом шаге. В случае, когда $H \rightarrow 1$, модель колебалась между несколькими токенами. Вычисление энтропии осуществляется следующим образом.

После прямого прохода GPT-2 получаем вероятности для 50257 токенов-кандидатов следующего слова. Пример (упрощенно, top-5): “forward” $\rightarrow p = 0.42$, “.” $\rightarrow p = 0.18$, “the” $\rightarrow p = 0.11$, “and” $\rightarrow p = 0.09$, остальные $\rightarrow p \approx 0.0000$. Тогда

$$H_{\text{abs}} = -\sum p \ln p = -(0.42 \cdot \ln 0.42 + 0.18 \ln 0.18 + \dots) \approx 2.31;$$

$$H = H_{\text{abs}} / \ln 50257 = 2.31 / 10.83 \approx 0.213.$$

2. Функции принадлежности

Для каждой переменной определены три терм-множества (Low, Medium, High) с теми же типами функций принадлежности (ФП), что в [7]: трапецевидные (граничные термы) и треугольная (средний терм). Параметры представлены в табл. 2., а графическое представление ФП на рис. 1.

Табл. 2. Параметры функций принадлежности нечеткого регулятора β^* .

Переменная	Терм	Тип ФП	Параметры	Интерпретация
$D \in [0, 1]$	Low	trapmf	[0.00, 0.00, 0.20, 0.40]	Монотонный контекст, TTR < 0.40
	Medium	trimf	[0.25, 0.50, 0.75]	Смешанный, TTR $\approx$ 0.50
	High	trapmf	[0.60, 0.80, 1.00, 1.00]	Разнообразный, TTR > 0.60
$H \in [0, 1]$	Low	trapmf	[0.00, 0.00, 0.20, 0.40]	Была уверенность, H < 0.40
	Medium	trimf	[0.25, 0.50, 0.75]	Умеренная, $H \approx$ 0.50
	High	trapmf	[0.60, 0.80, 1.00, 1.00]	Была неуверенность, H > 0.60
$\beta^* \in [0.3, 2.5]$	Low	trapmf	[0.30, 0.30, 0.65, 1.00]	$\beta^* \approx 0.5$: высокая избирательность (точный режим)
	Medium	trimf	[0.75, 1.00, 1.35]	$\beta^* \approx 1.0$: стандарт (нейтральный режим)
	High	trapmf	[1.20, 1.60, 2.50, 2.50]	$\beta^* \approx 1.8$: низкая избирательность (творческий режим)

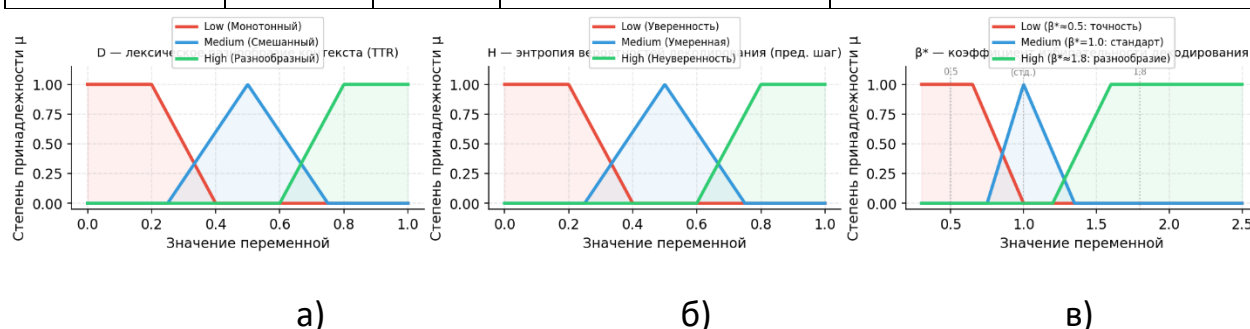


Рис. 1. Функции принадлежности: а) D (TTR контекста), б) H (энтропия вероятностей), в) β^* (коэффициент избирательности).

Построенные функции принадлежности (рис. 1) позволяют для любых входных значений D и H , а также для выходной переменной β^* , определить степень принадлежности к термам Low, Medium и High. Эти степени принадлежности используются на этапе фаззификации при активации базы нечетких правил, формализующей связь между лингвистическими характеристиками контекста и требуемым значением коэффициента избирательности декодирования.

3. База нечетких правил

База нечетких правил содержит 9 правил вида «ЕСЛИ D есть A_i И H есть B_i , ТО β^* есть C_i ».

Когнитивная интерпретация правил ориентирована на процесс генерации текста, так как при высоком D (разнообразный контекст) нужна высокая избирательность, то есть малое значение коэффициента β^* . При низком значении признака D , говорящем о повторяющемся контексте, необходимо сглаживание, то есть большое значение β^* . Влияние H отражает «уверенность» модели на предыдущем шаге. Нечеткие правила приведены в табл. 3.

Табл. 3. База нечетких правил регулятора β^* .

№	ЕСЛИ D	И H	ТО β^*	Когнитивное обоснование
1	High	Low	Low	Разнообразный контекст, модель была уверена → максимальная избирательность
2	High	Medium	Low	Разнообразный контекст, умеренная уверенность → высокая избирательность
3	High	High	Medium	Разнообразный, но модель колебалась → стандартный режим
4	Medium	Low	Low	Средний контекст, была уверенность → небольшое снижение β^*
5	Medium	Medium	Medium	Нейтральный режим → $\beta^* = 1.0$ (стандарт)
6	Medium	High	High	Средний контекст, была неуверенность → сглаживание
7	Low	Low	Medium	Монотонный контекст, но была уверенность → стандарт

№	ЕСЛИ D	И H	ТО β^*	Когнитивное обоснование
8	Low	Medium	High	Монотонный контекст, умеренная неуверенность → сглаживание
9	Low	High	High	Полностью монотонный, была неуверенность → максимальное сглаживание

Наглядное представление базы правил (табл. 3) в виде матрицы, где по осям отложены термы переменных D и H , а на пересечении указан результирующий терм β^* , показано на рис. 2.

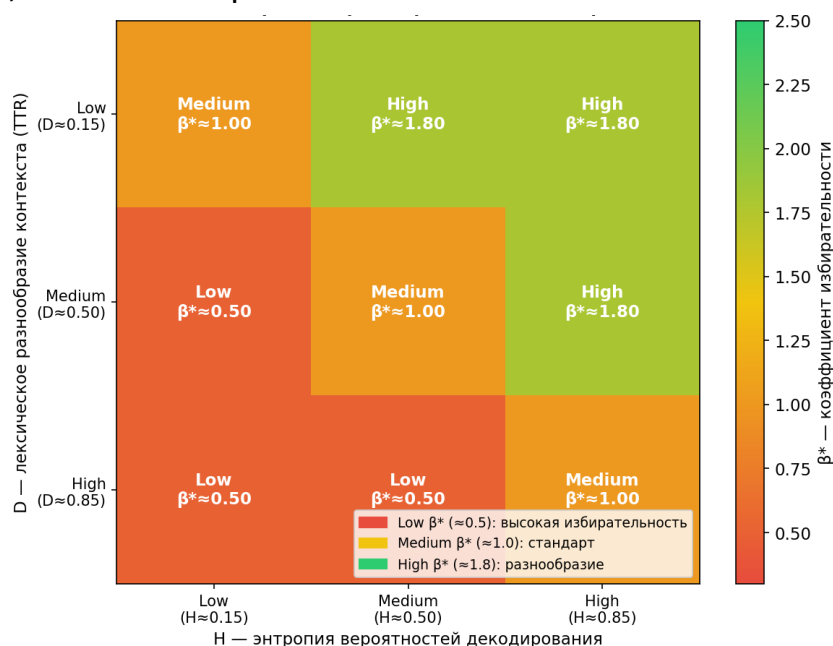


Рис. 2. Матрица нечетких правил, показывающая величину β^* в зависимости от комбинации термов D и H .

Представленная база правил (табл. 3, рис. 2) задает качественную связь между входными лингвистическими переменными и требуемым режимом декодирования. Для получения четкого числового значения β^* на каждом шаге генерации необходимо выполнить полный цикл нечеткого вывода, включающий фаззификацию входных признаков, активацию и агрегацию правил, а также дефаззификацию агрегированного результата. Соответствующий алгоритм рассмотрен ниже.

4. Алгоритм вывода Мамдани и дефаззификация

Нечетко-логический вывод осуществляется за три шага [5]. На первом шаге выполняется фаззификация, т. е. вычисляются степени принадлежности $\mu(D)$ и $\mu(H)$ ко всем термам функций принадлежности (см. рис. 1). На втором шаге с помощью композиционного правила Заде осуществляется активация правил с помощью операции нахождения минимума:

$$w_i = \min(\mu_{A_i(D)}, \mu_{B_i(H)}), \quad i = 1, \dots, 9.$$

Далее с помощью операции нахождения максимума выполняется агрегация заключений нечетко-логического вывода:

$$\mu_{agg(\beta^*)} = \max_{i=1}^3 (w_i, \mu_{C_i(\beta^*)}).$$

На заключительном шаге, третьем с помощью дефаззификатора центра тяжести (CoG) вычисляется четкое значение на выходе нечетко-логического вывода:

$$\beta^* = \frac{\int_{0.3}^{2.5} \beta \mu_{agg(\beta^*)} d\beta}{\int_{0.3}^{2.5} \mu_{agg(\beta^*)} d\beta}.$$

Интеграл вычислялся с помощью метода трапеций на сетке из $N = 1000$ узлов на отрезке $[0.3, 2.5]$. Вычислительная стоимость: $O(R \times N) = 9000$ операций < 1 мс (рис. 3 и 4).

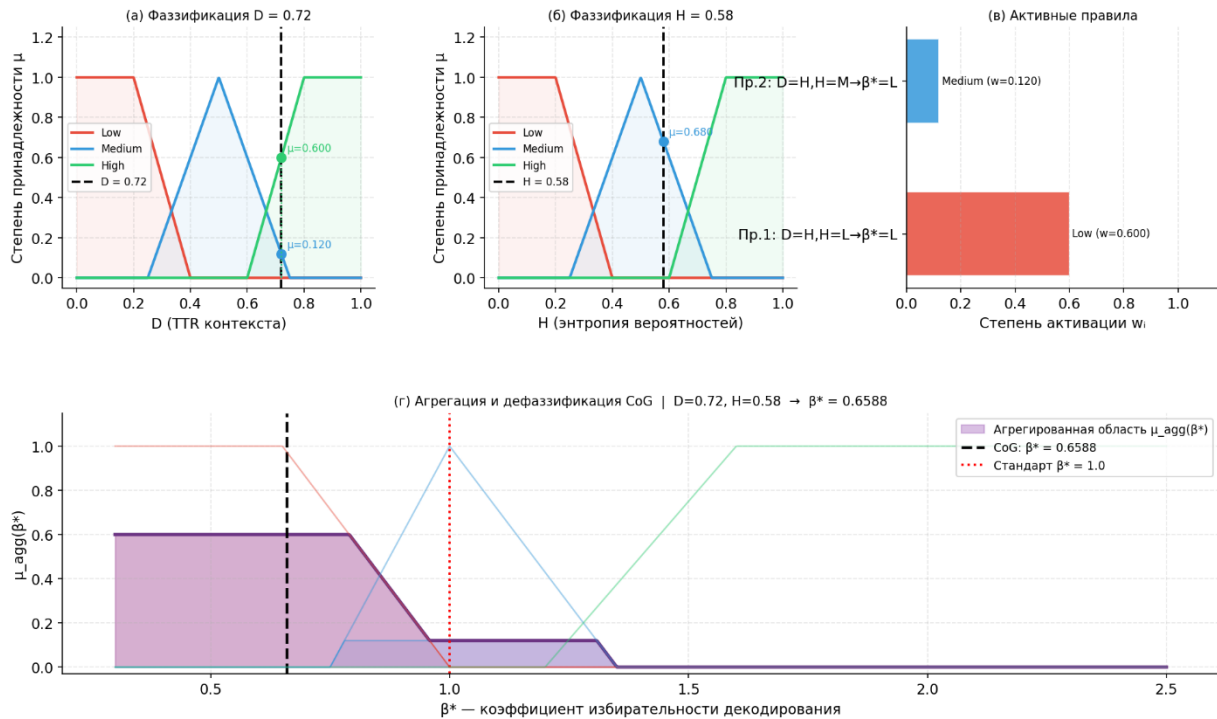


Рис. 3. Пример вывода Мамдани для $D = 0.72, H = 0.58$ (новостной текст): фаззификация D и H , агрегация и CoG $\rightarrow \beta^* = 0.659$.

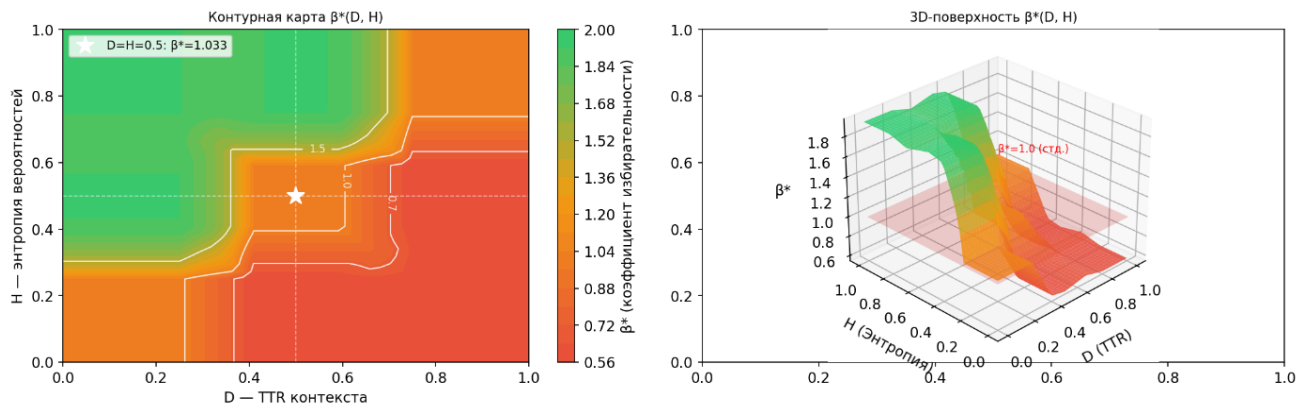


Рис. 4. Поверхность отклика $\beta^*(D, H)$: 3D-вид и контурная карта. Красная линия: $\beta^* = 1.0$ (граница стандартного режима).

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Алгоритм нечеткого регулятора реализован на языке программирования Python с использованием NumPy и Matplotlib. Модуль предоставляет три функции: `fuzzy_infer(d_val, h_val) → float`, реализующая нечеткий вывод β^* ;

`shannon_entropy(probas) → float`, для нормированная энтропия H ; `softmax(logits, beta) → array`, для вычисления Softmax с коэффициентом β^* .

Интеграция в функцию `generate_text_simple` [3] требует замены одной строки и добавления трех:

```
# Стандартная реализация (статья 3.1):
def generate_text_simple(model, idx, max_new_tokens, context_size):
    # idx: текущая последовательность токенов [B, T]
    for _ in range(max_new_tokens):
        # Шаг 1: Обрезаем до context_size последних токенов
        idx_cond = idx[:, -context_size:]
        # Шаг 2: Прямой проход (без вычисления градиентов)
        with torch.no_grad():
            logits = model(idx_cond)          # [B, T, vocab_size]
        # Шаг 3: Берем логиты только последней позиции
        logits = logits[:, -1, :]             # [B, vocab_size]
        # Шаг 4: Softmax → вероятностное распределение
        probas = torch.softmax(logits, dim=-1) # [B, vocab_size]
        # Шаг 5: Жадный выбор токена с максимальной вероятностью
        idx_next = torch.argmax(probas, dim=-1, keepdim=True)
        # [B, 1]
        # Шаг 6: Добавляем новый токен в последовательность
        idx = torch.cat((idx, idx_next), dim=-1) # [B, T+1]
    return idx
# probas = torch.softmax(logits, dim=-1)
# Адаптивная реализация с нечетким регулятором  $\beta^*$ :
D = compute_ttr(idx[0].tolist())          # TTR сгенерированного
контекста
H = shannon_entropy(prev_probas)           # энтропия предыдущего
шага
beta_star = fuzzy_infer(D, H)              # нечеткий регулятор
probas = torch.softmax(logits/beta_star, dim=-1) # адаптивный
Softmax
```

ЧИСЛОВОЙ ПРИМЕР

Рассмотрим пример на шаге генерации научного текста. Контекст из последних восьми токенов: «нейронная сеть обучается методом обратного распространения» – представлен в табл. 4. Логиты для шести токенов-кандидатов имеют вид $L = [2.8, 0.8, 7.0, 0.5, 0.2, 0.1]$.

1. Входные признаки

$D = \text{TTR}(\text{контекст}) = 8/8 = 1.0$ (все токены уникальны в данном научном тексте). H_{prev} = энтропия предыдущего шага ≈ 0.18 (модель была уверена на предыдущем шаге).

2. Нечеткий регулятор

Фаззификация при $D = 1.0$, $H_{\text{prev}} = 0.18$:

$\mu_{\text{High}}(D) = 1.0$, $\mu_{\text{Low}}(H) = 1.0 \rightarrow$ активно правило 1 ($w_1 = 1.0$): ТО $\beta^* = \text{Low}$. CoG для термина Low: $\beta^* = 0.573$. Следует отметить, что стандартное значение коэффициента избирательности декодирования эквивалентно единице, и полученное значение в 1.75 раза ниже стандартного.

3. Сравнение Softmax

Для количественного сравнения стандартного и адаптивного режимов декодирования рассмотрим конкретный шаг генерации научного текста. Контекст содержит фрагмент «нейронная сеть обучается методом обратного распространения», и модель предсказывает продолжение для токена-запроса «обучается». Вектор логитов для шести токенов-кандидатов имеет вид $L = [2.8, 0.8, 7.0, 0.5, 0.2, 0.1]$, где значение $L_3 = 7.0$ соответствует токеноу «обучается» как наиболее семантически связанному с запросом через механизм самовнимания.

Входные признаки нечеткого регулятора для данного контекста: $D = 0.88$ (высокое лексическое разнообразие терминологического текста) и $H = 0.18$ (низкая энтропия предшествующего шага, свидетельствующая об уверенности модели). По результатам нечеткого вывода регулятор формирует значение $\beta^* = 0.573$, что соответствует терму Low коэффициента избирательности. В табл. 4 приведены вероятности всех шести токенов-кандидатов при стандартном $\beta^*_{\text{std}} = 1.0$ и адаптивном $\beta^* = 0.573$.

Табл. 4. Сравнение распределений вероятностей при стандартном $\beta^* = 1.0$ и нечетком $\beta^* = 0.573$ (научный текст).

Токен	Логит L	Стандарт $\beta^*=1.0$	Нечеткий $\beta^*=0.573$	Δ вероятности
t_1 = «нейронная»	2.8	0.0963	0.0007	-0.0956
t_2 = «сеть»	0.8	0.0354	0.0000	-0.0354
t_3 = «обучается»	7.0	0.7865	0.9993	+0.2128
t_4 = «методом»	0.5	0.0305	0.0000	-0.0305
t_5 = «обратного»	0.2	0.0262	0.0000	-0.0262
t_6 = «распространения»	0.1	0.0250	0.0000	-0.0250
Сумма вероятностей Σ	—	1.0000	1.0000	—

Нечеткий регулятор (табл. 4) концентрирует 99.93% вероятности на токене «обучается». При это энтропия Шеннона стандартного распределения $H_{std} = 0.0660$. Энтропия при $\beta^* = 0.573$ составляет $H_{\beta^*} = 0.0033$. В числовом примере наблюдается снижение энтропии почти в 20 раз ($\Delta H = -0.0627$). Для передачи на следующий шаг генерации формируется новое значение: $H_{next} = H_{\beta^*} = 0.0033$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Методика эксперимента

Для оценки эффективности предлагаемого метода был проведен сравнительный эксперимент на восьми типах текстовых фрагментов, охватывающих весь диапазон лингвистических характеристик от насыщенного научного текста до монотонных повторяющихся инструкций. Для каждого типа текста задавались два входных признака нечеткого регулятора. Признак D (TTR сгенерированного контекста) и признак H (энтропия вероятностей предыдущего шага) выбирались на основе анализа реальных данных соответствующих типов текста. Научный текст характеризуется высоким значением $D \approx 0.88$, что отражает высокую долю уникальных терминов, а также низким значением $H \approx 0.18$, свидетельствующим об уверенности модели при прогнозировании следующего токена. Монотонный текст, напротив, характеризуется низким $D \approx 0.15$ вследствие частого повторения

одних и тех же лексических единиц и высоким $H \approx 0.82$, отражающим затруднения модели при выборе среди шаблонных конструкций. Важно отметить, что оба признака D и H являются общими для регуляторов из работ [6] и [7], что открывает возможность их совместного вычисления.

Нечетким регулятором для каждого типа текста вычислялось значение β^* , после чего функция Softmax применялась к тестовому вектору логитов $L = [2.8, 0.8, 7.0, 0.5, 0.2, 0.1]$, соответствующему шести токенам-кандидатам. Данный вектор имитирует типичную ситуацию при генерации технического текста: значение $L_3 = 7.0$ соответствует явно доминирующему токenu, $L_1 = 2.8$ – умеренно релевантному, а остальные четыре токена имеют слабую релевантность.

В эксперименте сравнивались два режима декодирования. В стандартном режиме значение $\beta^*_{std} = 1.0$ использовалось для всех типов текста без адаптации, что соответствует реализации функции `generate_text_simple` (разд. 4). В адаптивном режиме значение $\beta^* = \beta^*(D, H)$ вычислялось нечетким регулятором независимо для каждого типа текста и каждого шага генерации.

Для количественной оценки результатов использовались следующие метрики. Величина H_{std} представляет нормированную энтропию Шеннона при стандартном $\beta^*_{std} = 1.0$. Величина H_{β^*} представляет энтропию при адаптивном β^* . Изменение энтропии $\Delta H = H_{\beta^*} - H_{std}$ характеризует направление адаптации: отрицательное значение ΔH указывает на повышение избирательности декодирования, положительное – на расширение поля выбора. Дополнительно фиксировалась максимальная вероятность токена $\max(p)_{\beta^*}$ при адаптивном β^* .

Следует заметить, что в [7] основной метрикой служила энтропия весов внимания многоголового механизма самовнимания. В настоящей работе та же метрика применялась к распределению вероятностей декодирования `probas`. Это обеспечивает методологическое единство трилогии, поскольку энтропия Шеннона выступает универсальной мерой концентрации распределения на всех трех этапах работы языковой модели.

2. Результаты

В табл. 5 приведены значения β^* , изменение $\Delta \beta^*$ относительно стандарта, а также показатели энтропии и максимальной вероятности для всех

восьми типов текста. Нижняя строка таблицы соответствует стандартному режиму $\beta^*_{std} = 1.0$, который является базой сравнения для всех остальных строк.

Табл. 5. Результаты сравнительного анализа для 8 типов текста; $\Delta \beta^* = \beta^* - 1.0$.

Тип текста	D	H	β^*	$\Delta \beta^*$	H_{std}	H_{β^*}	ΔH	$\max(p)_{\beta^*}$
Научный	0.88	0.18	0.5722	-0.4278	0.0660	0.0033	-0.0627	0.9993
Новостной	0.72	0.32	0.6931	-0.3069	0.0660	0.0110	-0.0550	0.9974
Художественный	0.65	0.45	0.8483	-0.1517	0.0660	0.0318	-0.0342	0.9912
Стандартный	0.50	0.50	1.0333	+0.0333	0.0660	0.0754	+0.0094	0.9764
Диалоговый	0.42	0.58	1.0359	+0.0359	0.0660	0.0761	+0.0101	0.9761
Тех. Шаблон	0.28	0.70	1.8226	+0.8226	0.0660	0.3917	+0.3257	0.8278
Монотонный	0.15	0.82	1.9439	+0.9439	0.0660	0.4400	+0.3740	0.7995
Инструкции	0.10	0.88	1.9439	+0.9439	0.0660	0.4400	+0.3740	0.7995
Стандарт $\beta^*_{std} = 1.0$			1.0000	0.0000	0.0660	0.0660	0.0000	0.9798

Примечание: Отрицательный ΔH означает повышение избирательности, положительный ΔH – расширение поля выбора.

Из анализа табл. 5 прослеживается четкая закономерность. При переходе от научного текста к монотонному типу текста значение β^* монотонно возрастает от 0.572 до 1.944, тогда как энтропия H_{β^*} возрастает от 0.003 до 0.440. Три типа текста с высоким D (научный, новостной, художественный) имеют $\beta^* < 1.0$, что означает повышение избирательности относительно стандарта. Два типа с умеренными характеристиками (стандартный и диалоговый) имеют $\beta^* \approx 1.0$, т. е. регулятор практически не изменяет стандартное поведение модели. Три типа с низким D (технический шаблон, монотонный текст, инструкции) имеют $\beta^* \gg 1.0$, что обеспечивает сглаживание распределения вероятностей (рис. 5).

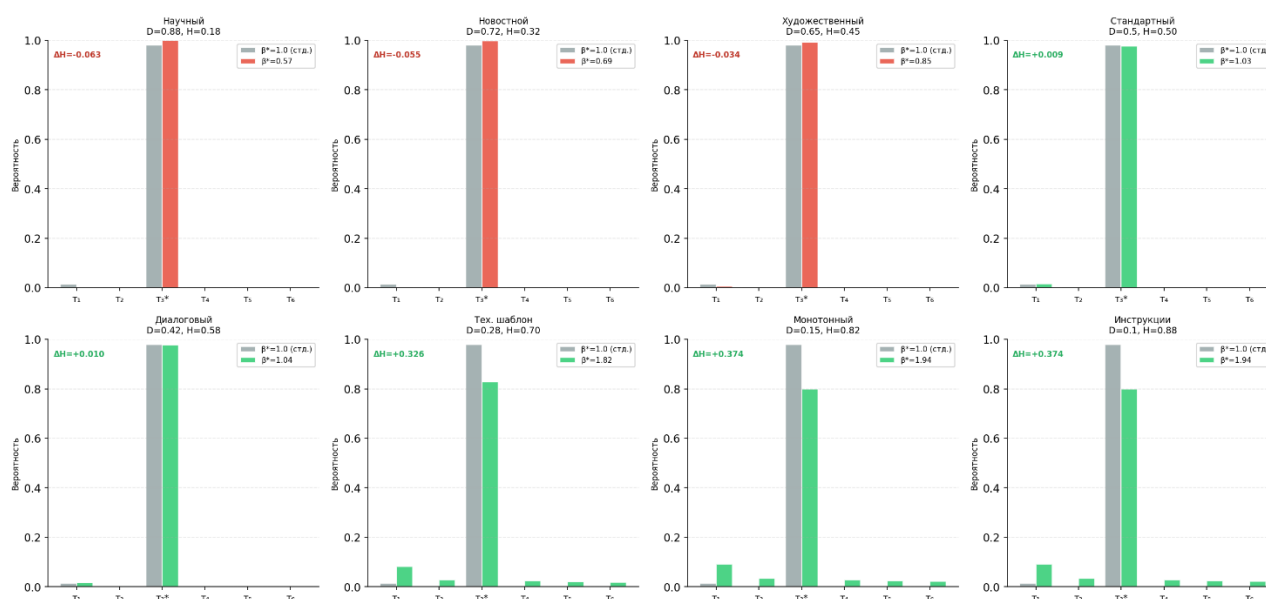


Рис. 5. Распределение вероятностей: стандартный $\beta^* = 1.0$ (серый) и адаптивный β^* (цветной) для восьми типов генерируемого текста. Красные столбцы соответствуют $\beta^* < 1$ (высокая избирательность), зеленые – $\beta^* > 1$ (расширение поля выбора).

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты (табл. 5, рис. 5, 6) позволяют выделить ряд характерных свойств предложенного нечеткого регулятора коэффициента избирательности декодирования. Ниже рассматриваются шесть таких свойств, отражающих его поведение в различных лингвистических режимах генерируемого текста, от терминологически насыщенного до монотонного повторяющегося.

Свойство 1. Монотонная зависимость β^* от характеристик контекста

Из табл. 5 видно, что β^* монотонно убывает с ростом D и монотонно возрастает с ростом N , что соответствует когнитивной интерпретации базы правил. Диапазон адаптации составляет от $\beta^* = 0.572$ для научного текста до $\beta^* = 1.944$ для монотонного, т. е. имеем разброс в 3.4 раза относительно стандартного $\beta^*_{\text{std}} = 1.0$ (рис. 6).

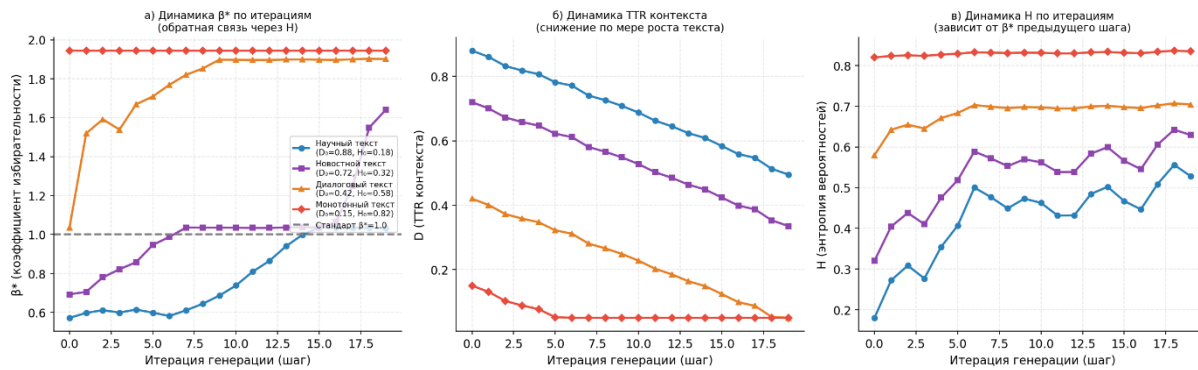


Рис. 6. Динамика β^* , TTR и H по 20 итерациям авторегрессионной генерации для четырех типов текста. По мере снижения TTR контекста β^* адаптивно возрастает.

Свойство 2. Воспроизведение стандарта в нейтральном режиме

При $D = 0.50$ и $H = 0.50$, что соответствует тексту со средними лингвистическими характеристиками, регулятор формирует значение $\beta^* = 1.033$, близкое к стандартному $\beta^*_{\text{std}} = 1.0$. Отклонение $\Delta \beta^* = +0.033$ составляет 3.3% и обусловлено незначительной асимметрией функций принадлежности терма Medium. Данный результат подтверждает корректность выбранной базы правил, т. е. при отсутствии выраженных лингвистических особенностей контекста нечеткий регулятор не изменяет стандартное поведение модели.

Свойство 3. Снижение энтропии для терминологически насыщенного текста

Для научного текста с $D = 0.88$ и $H = 0.18$ нечеткий регулятор формирует значение $\beta^* = 0.572$, что приводит к существенному обострению распределения вероятностей. Энтропия снижается с $H_{\text{std}} = 0.0660$ до $H_{\beta^*} = 0.0033$, т. е. уменьшается в 20 раз. Максимальная вероятность токена при этом возрастает с 0.980 до 0.999. В терминах теории информации распределение переходит от умеренно сфокусированного к практически вырожденному, являясь дискретным аналогом дельта-функции Дирака.

Количественно изменение энтропии для научного текста составляет

$$\Delta H = H_{\beta^*} - H_{\text{std}} = 0.0033 - 0.0660 = -0.0627, \quad \frac{H_{\text{std}}}{H_{\beta^*}} = \frac{0.0660}{0.0033} \approx 20,$$

т. е. наблюдается снижение энтропии в 20 раз.

Свойство 4. Расширение поля выбора для монотонного текста

Для монотонного текста и простых инструкций, у которых $D \leq 0.15$ и $H \geq 0.82$, регулятор формирует $\beta^* = 1.944$. Это приводит к сглаживанию распределения вероятностей: $H_{\beta^*} = 0.440$ против $H_{\text{std}} = 0.066$, т. е. энтропия возрастает в 6.7 раза. Максимальная вероятность снижается с 0.980 до 0.800, что означает перераспределение вероятностной массы от токена-лидера в пользу других кандидатов. Практическим следствием является снижение вероятности циклического воспроизведения одних и тех же шаблонных конструкций при декодировании.

Свойство 5. Временная обратная связь при энтропии

В отличие от [6] и [7], где нечеткий регулятор применялся независимо к каждому фрагменту, в предлагаемом методе значение H на шаге i зависит от значения β^* , полученного на предыдущем шаге $i-1$. Малое β^* порождает острое распределение, что приводит к малой величине H на следующем шаге и, соответственно, снова к малому значению β^* . Это замкнутая система с положительной обратной связью, обеспечивающая устойчивое удержание точного режима генерации для терминологических контекстов [10, 11]. Аналогичным образом для монотонных контекстов система устойчиво удерживается в режиме расширенного поля выбора.

Свойство 6. Совместный блок фаззификации D и H : перспектива объединения регуляторов

Ключевым архитектурным наблюдением настоящей работы является то, что признаки D и H служат входными переменными одновременно для двух нечетких регуляторов: τ^* из [7], адаптирующего коэффициент масштабирования механизма многоголового самовнимания, и β^* из настоящей работы, адаптирующего коэффициент избирательности декодирования. Обе переменные вычисляются по одним и тем же данным и описываются одинаковыми функциями принадлежности.

Это открывает возможность реализации единого блока фаззификации, выполняемого один раз и передающего результаты параллельно обоим регуляторам. Такой подход обладает тремя практическими преимуществами.

Во-первых, это снижение вычислительной стоимости. В стандартной реализации каждый регулятор выполняет фаззификацию независимо, что требует $2 \text{ переменных} \times 3 \text{ терма} \times 2 \text{ регулятора} = 12$ вычислений функций принадлежности. При совместной фаззификации достаточно $2 \text{ переменных} \times 3 \text{ терма} = 6$ вычислений, что вдвое меньше. Активация правил и дефаззификация при этом остаются независимыми для каждого регулятора, поскольку базы правил различаются по своей ориентации на механизм внимания и на декодирование соответственно.

Во-вторых, позволяет сформировать единую архитектуру нечеткого управления для всего цикла работы языковой модели. Совмещение фаззификации трех регуляторов из работ [6, 7] и настоящей статьи в одном блоке образует единый нечетко-логический контроллер, охватывающий этапы подготовки данных, механизма внимания и декодирования.

В-третьих, появляется возможность совместной оптимизации параметров нескольких регуляторов. При единой фаззификации становится возможным одновременно уменьшать τ^* для обострения механизма внимания и уменьшать β^* для повышения избирательности декодирования при высоком D , что усиливает эффект концентрации на семантически значимых токенах на всех этапах обработки.

В табл. 6 приведено сравнение вычислительной стоимости отдельной и совместной фаззификации для всех трех регуляторов.

Реализация совместного блока фаззификации потребует незначительной модификации кода. Функция `fuzzy_infer` разделяется на два независимых шага: `fuzzify(d_val, h_val)`, возвращающую пару (μ_d, μ_h) , и `infer_from_mu(mu_d, mu_h, rules, MF)`, выполняющую активацию правил и дефаззификацию. Результат функции `fuzzify()` передается всем регуляторам, каждый из которых выполняет только собственные шаги вывода. Исследование единого нечетко-логического контроллера для полного цикла работы языковой модели является перспективным направлением развития настоящей работы.

Табл. 6. Сравнение вычислительной стоимости отдельной и совместной фаззификации для трех регуляторов трилогии.

Этап	Отдельная фаззификация	Совместная фаззификация	Сокращение
Вычисление ФП переменных D и H	3 термина × 2 регулятора = 6 вызовов	3 термина × 1 блок = 3 вызова	2×
Активация правил (AND = min)	9 правил × 2 = 18 операций	9 + 9 = 18 (без изменений)	1×
Дефаззификация CoG	2 × N_GRID операций	2 × N_GRID (без изменений)	1×
Итого вычислений ФП (все 3 регулятора трилогии)	3 × 6 = 18 вычислений ФП	1 × 6 = 6 вычислений ФП	3×

При объединении регуляторов в одно число вычислений степеней функций принадлежности сокращается в 3 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен нечетко-логический метод адаптивного вычисления коэффициента избирательности декодирования β^* при авторегрессионной генерации текста языковыми моделями. Метод заменяет фиксированное единичное значение адаптивным значением, вычисляемым на каждом шаге генерации на основе нечеткого регулятора Мамдани с двумя входными признаками (лексическое разнообразие контекста D и энтропия вероятностей H) и дефаззификацией методом центра тяжести.

Регулятор обладает тремя ключевыми свойствами. Во-первых, для терминологически насыщенного текста ($D = 0.88$, $H = 0.18$) регулятор снижает β^* до 0.57, уменьшая энтропию распределения вероятностей в 20 раз ($0.0660 \rightarrow 0.0033$). Во-вторых, для нейтрального текста ($D = 0.50$, $H = 0.50$) регулятор воспроизводит стандартное значение $\beta^* \approx 1.0$. В-третьих, для монотонного повторяющегося контекста ($D = 0.15$, $H = 0.82$) регулятор повышает β^* до 1.94, стимулируя разнообразие и предотвращая заикание генерации.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию № 075-03-2026-489.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vaswani A., Shazeer N., Parmar N. et al.* Attention Is All You Need // *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2017. Vol. 30. P. 6000–6010.
2. *Lee S.E.* Language Models are Unsupervised Multitask Learners (GPT-2) // OpenAI. Seoul National University, 2024. https://cdn.openai.com/better-language-models/language_models_are_unsupervised_multitask_learners.pdf
3. *Рашка С.* Строим LLM с нуля. СПб: Питер, 2026. 384 с.
4. *Zadeh L.A.* Fuzzy sets // *Information and Control*. 1965. Vol. 8, No. 3. P. 338–353.
5. *Mamdani E.H.* Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant // *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*. 1974. Vol. 121(12). P. 1585–1588.
6. *Бобырь, М. В., Н. А. Милостная, и С. Ю. Бельская.* Нечетко-логическая адаптация параметров скользящего окна при подготовке данных для больших языковых моделей // *Электронные библиотеки*. 2026 т. 29, вып. 4, сс. 1318-37. doi:10.26907/1562-5419-2026-29-4-1318-1337.
7. *Bobyry, M., Milostnaya, N., Belskaya, S.* A Unified Fuzzy Logic Controller for Adaptive Text Generation in Large Language Models // *SSRN*. 2026. doi: 10.2139/ssrn.6819385.
8. *Klüver J.* A mathematical theory of communication: Meaning, information, and topology // *Complexity*. 2011. Vol. 16 (3). P. 10–26. <https://doi.org/10.1002/cplx.20317>
9. *Holtzman A., Buys J., Du L., Forbes M., Choi Y.* The curious case of neural text degeneration // *Computation and Language*. 2020. arXiv:1904.09751. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1904.09751>

10. Bobyr M. Area ratio method for stability analysis of fuzzy logic and neuro-fuzzy systems with bifurcation validation // Information Sciences. 2026. №. 732. P. 122928. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2025.122928>

11. Бобырь М.В. Устойчивость в нечетко-логических и нейро-нечетких системах. М: ИНФРА-М, 2026. 271 с.

FUZZY-LOGIC ADAPTATION OF THE DECODING SELECTIVITY COEFFICIENT IN AUTOREGRESSIVE TEXT GENERATION BY LANGUAGE MODELS

M. V. Bobyr¹ [0000-0002-5400-6817], **N. A. Milostnaya**² [0000-0002-3779-9165],

S. Y. Belskaia³ [0009-0000-2013-9972]

¹⁻³*Southwest State University, Kursk, Russia*

¹maxboby@gmail.com, ²nat_mil@mail.ru, ³s@belskaia.ru

Abstract

In autoregressive text generation using language models (LLM), the next token is selected using a softmax function with a fixed decoding coefficient equal to one, which is the same for all generation steps and all text types. This approach does not take into account the dynamically changing linguistic characteristics of the generated context. For example, a text with high lexical diversity requires high selectivity, meaning the decoding coefficient should be small. A monotone, repetitive context requires a smoother distribution, meaning the decoding coefficient should be large. This article proposes a fuzzy controller for calculating the decoding selectivity coefficient using two linguistic features: the lexical diversity of the generated context and the Shannon entropy of the probability distribution at the previous step. The fuzzy controller is implemented using the Mamdani algorithm with a base of nine fuzzy logic rules and a defuzzifier based on the center-of-gravity method. The effectiveness of the proposed approach lies in the fact that for terminologically rich text, the fuzzy controller reduces the Shannon entropy of the probability distribution by more than 20 times compared to the standard approach.

Keywords: *Fuzzy inference, Mamdani algorithm, autoregressive generation, Softmax, LLM, selectivity coefficient, TTR, probability entropy, GPT.*

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education under State Contract no. 075-03-2026-489.

REFERENCES

1. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N. et al. Attention Is All You Need // Advances in Neural Information Processing Systems. 2017. Vol. 30. P. 6000–6010.
2. Lee S.E. Language Models are Unsupervised Multitask Learners (GPT-2) // OpenAI. Seoul National University, 2024. https://cdn.openai.com/better-language-models/language_models_are_unsupervised_multitask_learners.pdf
3. Rashka S. Building LLM from Scratch. St. Petersburg: Piter, 2026. 384 p.
4. Zadeh L.A. Fuzzy sets // Information and Control. 1965. Vol. 8, No. 3. P. 338–353.
5. Mamdani E.H. Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant // Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. 1974. Vol. 121(12). P. 1585–1588.
6. Bobyr M.V., Milostnaya N.A., Belskaia S.Yu. Fuzzy-logic adaptation of sliding window parameters in data preparation for large language models // Electronic libraries. 2026. Vol. 29, Is. 4, pp. 1318-37. doi:10.26907/1562-5419-2026-29-4-1318-1337.
7. Bobyr, M., Milostnaya, N., Belskaya, S. A Unified Fuzzy Logic Controller for Adaptive Text Generation in Large Language Models // SSRN. 2026. doi: 10.2139/ssrn.6819385.
8. Klüver J. A mathematical theory of communication: Meaning, information, and topology // Complexity. 2011. Vol. 16 (3). P. 10–26. <https://doi.org/10.1002/cplx.20317>
9. Holtzman A., Buys J., Du L., Forbes M., Choi Y. The curious case of neural text degeneration // Computation and Language. 2020. arXiv:1904.09751. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1904.09751>

10. *Bobyry M.* Area ratio method for stability analysis of fuzzy logic and neuro-fuzzy systems with bifurcation validation // Information Sciences. 2026. №. 732. P. 122928. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2025.122928>

11. *Bobyry M.V.* Stability in fuzzy-logic and neuro-fuzzy systems. Moscow: INFRA-M, 2026. 271 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



БОБЫРЬ Максим Владимирович – 1978 года рождения, учился в Курском государственном техническом университете (ныне – Юго-Западный государственный университет). В 2012 году защитил диссертацию на соискание доктора технических наук по специальности 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами». В настоящее время работает профессором на кафедре программной инженерии. Является председателем диссертационного совета по специальности 5.12.4 «Когнитивное моделирование».

Область научных интересов: адаптивные нейро-нечеткие системы вывода, цифровая обработка изображений и распознавание образов, машинное обучение, стереозрение.

Maksim Vladimirovich BOBYR – born in 1978, studied at Kursk State Technical University (now Southwest State University). In 2012, he defended his dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.13.06 Automation and Control of Technological Processes and Production. Currently, he works as a professor at the Department of Software Engineering. He is the chairman of the dissertation council for specialty 5.12.4 Cognitive Modeling.

Research interests: adaptive neuro-fuzzy inference systems, digital image processing and pattern recognition, machine learning, stereo vision.

email: maxbobyry@gmail.com

ORCID: 0000-0002-5400-6817



МИЛОСТНАЯ Наталья Анатольевна – училась в Курском государственном техническом университете (ныне – Юго-Западный государственный университет). В 2023 году защитила диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика. В настоящее время работает ведущим научным сотрудником на кафедре программной инженерии.

Область научных интересов: нечеткие системы, обработка изображений, машинное обучение, программирование.

Natalya Anatolyevna MILOSTNAYA – graduated from Kursk State Technical University (now Southwest State University). In 2023, she defended her dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 2.3.1. System Analysis, Control, Information Processing, and Statistics. Currently, she works as a leading researcher at the Department of Software Engineering. Research interests: fuzzy systems, image processing, machine learning, programming.

email: nat_mil@mail.ru

ORCID: 0000-0002-3779-9165



БЕЛЬСКАЯ Светлана Юрьевна – училась в Юго-Западном государственном университете. В настоящее время учится в аспирантуре Юго-Западного государственного университета на кафедре программной инженерии по специальности 5.12.4. Когнитивное моделирование (технические науки). Патентный поверенный РФ, регистрационный номер в реестре 2880.

Область научных интересов: обучающие нечетко-логические системы, LLM.

Svetlana Yurievna BELSKAIA – she studied at Southwestern State University. Currently, he is studying at the graduate school of Southwest State University at the Department of Software Engineering, specializing in 5.12.4. Cognitive Modeling (technical Sciences). Patent Attorney of the Russian Federation, registration number in the register 2880, Research interests: training fuzzy logic systems, LLM.

email: s@belskaia.ru

ORCID: 0009-0000-2013-9972

Материал поступил в редакцию 2 апреля 2026 года

КОГНИТИВНАЯ АДАПТАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СКОЛЬЗЯЩЕГО ОКНА БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО МЕТОДА ОТНОШЕНИЯ ПЛОЩАДЕЙ

Е. О. Брежнева^[0000-0003-0039-3425]

Юго-западный государственный университет, г. Курск, Россия

bregnevaeo@mail.ru

Аннотация

Предложен метод адаптивного управления параметрами скользящего окна больших языковых моделей на основе нечеткого вывода Мамдани с дефаззификацией по быстродействующему методу отношения площадей (MAR-II). Управляющими переменными являются индекс лексического разнообразия (TTR) и средняя длина BPE-токена (ATL), интерпретируемые как измеримые корреляты когнитивной нагрузки текстового фрагмента. Нечеткий регулятор на основе девяти правил вырабатывает шаг скользящего окна (stride) и длину контекста (max_length). Проведено сравнение MAR-II с методом центра тяжести (CoG) на сетке 25 × 25 точек входного пространства (RMSE по stride 99.9 токена, по max_length 147.4 токена). Показано, что MAR-II обеспечивает аддитивность нечеткой модели и устраняет систематические ошибки CoG при времени вычисления одного нечеткого вывода около 35 нс на ПЛИС Xilinx Spartan 3E.

Ключевые слова: когнитивное моделирование, нечеткая логика, метод отношения площадей, скользящее окно, языковая модель, ПЛИС, дефаззификация, нечеткий регулятор Мамдани.

ВВЕДЕНИЕ

Задача формирования скользящего контекстного окна при подаче текста на вход больших языковых моделей (LLM) является важным этапом предобработки данных. Как правило, параметры скользящего окна LLM, такие как шаг (stride) и длина (max_length), задаются фиксированными значениями, не учиты-

вающими лингвистическую неоднородность входного корпуса. Однако семантически насыщенный научный текст и простой повторяющийся текст требуют принципиально различных режимов дискретизации.

Одним из эффективных инструментов адаптивного управления являются нечетко-логические системы. Для дефаззификации в таких системах традиционно применяют метод центра тяжести (CoG, Center of Gravity) [1]. Однако CoG обладает рядом известных недостатков, к которым относятся сужение диапазона дефаззификации, при котором невозможно получить минимальное или максимальное значение суппорта выходной переменной, а также нечувствительность к изменениям входных переменных в случае, когда несколько правил имеют одинаковые заключения [1, 2].

В качестве альтернативы в работах [2, 3] предложены метод отношения площадей (MAR – Method of Areas' Ratio) и его две быстродействующие модификации, включая MAR-II, используемый в настоящем исследовании. Принципиальное преимущество MAR-II состоит в том, что он обеспечивает аддитивность нечеткой системы, а также позволяет получить на выходе любое значение из полного суппорта выходной переменной. Сравнение статистических оценок моделей дефаззификации на основе RMSE и MAPE показало преимущество MAR-II по сравнению с CoG [3]. Реализация MAR-II на ПЛИС Xilinx Spartan 3E в параллельно-конвейерной архитектуре обеспечивает время вычисления одного нечеткого вывода около 35 нс при тактовой частоте 100 МГц [3, 7], что на порядки превосходит программные реализации и делает MAR-II перспективным для встроенных систем реального времени.

Настоящее исследование развивает предшествующую работу авторов [4] в следующих направлениях. Во-первых, при выборе размера скользящего окна вместо классического дефаззификатора CoG использован MAR-II. Во-вторых, введена интерпретация входных переменных в рамках концепции когнитивного моделирования, с использованием двух входных переменных: 1) TTR (Type-Token Ratio – отношение числа уникальных словоформ к общему числу словоформ во фрагменте); 2) ATL (Average Token Length – средняя длина BPE-токена в символах), которые трактуются как измеримые корреляты когнитивной нагрузки [5, 6]. При этом нечеткий регулятор применен как интеллектуальный агент, адаптирующий глубину обработки к семантической плотности текста.

В-третьих, выполнено количественное сравнение CoG и MAR-II на систематической сетке входного пространства.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И КОГНИТИВНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Пусть входной текст разбит на фрагменты скользящим окном со следующими параметрами: размер шага $\text{stride} \in [1, 256]$ токенов и длина контекста $\text{max_length} \in [4, 512]$ токенов. Требуется построить систему автоматической настройки этих параметров в зависимости от лингвистических характеристик текущего фрагмента.

В качестве входных переменных нечеткого регулятора приняты следующие переменные и их обозначения. Переменная x_1 обозначает Type-Token Ratio (TTR) $\in [0, 1]$, характеризующий лексическое разнообразие фрагмента, а переменная x_2 – среднюю длину BPE-токена (ATL) $\in [1, 8]$. Высокие значения TTR и ATL соответствуют семантически насыщенному тексту (научный стиль); низкие – повторяющемуся тексту.

Приведем пример вычисления переменных. Пусть фрагмент текста содержит 20 токенов, 17 из которых уникальные. Тогда $\text{TTR} = 17/20 = 0.85$. Если суммарное число символов во всех 20 токенах равно 124, то $\text{ATL} = 124/20 = 6.2$ символа/токен. Данная пара значений ($\text{TTR} = 0.85$, $\text{ATL} = 6.2$) соответствует насыщенному научному тексту и использована в дальнейшем как первый характерный сценарий работы регулятора. Например, фрагмент простого повторяющегося текста из 20 токенов, среди которых лишь 4 уникальных, и средняя длина токена 2.1 символа дают $\text{TTR} = 0.20$, $\text{ATL} = 2.1$.

В рамках концепции когнитивного моделирования скользящее окно LLM интерпретируется как аналог рабочей памяти когнитивного агента [5, 6]. Высокий TTR и длинные токены сигнализируют о необходимости узкого окна с малым шагом. Простой текст допускает широкий шаг и меньший контекст. Предложенный нечеткий регулятор формализует это правило адаптации.

Для количественной характеристики режима работы введен индекс когнитивной плотности обработки $K = \text{max_length}/\text{stride}$. При $K \gg 1$ (большое перекрытие окон) агент работает в режиме глубокого анализа; при $K \approx 1$ имеем режим быстрого сканирования. Например, для научного текста ($\text{TTR} = 0.85$, $\text{ATL} = 6.2$) нечеткий регулятор выдает $\text{stride} = 25$ токенов и $\text{max_length} = 462$ токена, значит,

$K = 462/25 \approx 18.5$. Следовательно, имеем режим плотного перекрытия окон с глубоким анализом каждого фрагмента. Для простого текста ($TTR = 0.20$, $ATL = 2.1$) регулятор выдает $stride = 231$ и $max_length = 52$, получаем $K = 52/231 \approx 0.2$, и это режим быстрого сканирования без перекрытия.

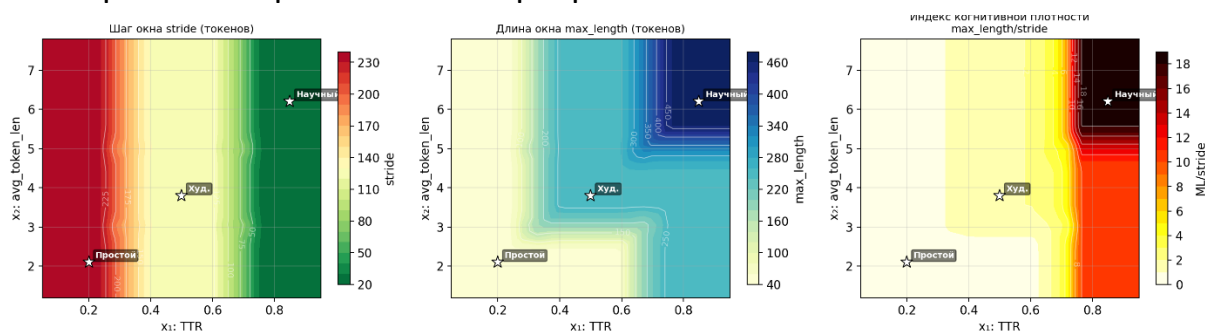


Рис. 1. Карта адаптации параметров скользящего окна в пространстве лингвистических характеристик текста.

Рис. 1 наглядно демонстрирует три характерные зоны адаптации. В левой верхней зоне (низкий TTR, высокий ATL) индекс K принимает промежуточные значения порядка 2–4. Таким образом, длинные токены при малом разнообразии соответствуют технической документации с повторяющейся терминологией. Центральная зона (средние TTR и ATL) соответствует художественному тексту с $K \approx 2$, где регулятор устанавливает сбалансированный режим $stride = 128$, $max_length = 256$. Правая верхняя зона (высокий TTR, высокий ATL) – это область научного текста с максимальным $K \approx 18$, где требуется наиболее детальная обработка. Таким образом, карта на рис. 1 представляет собой визуализацию стратегии адаптивного внимания нечеткого агента в полном пространстве входных переменных.

СТРУКТУРА НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА

Функции принадлежности входных переменных

Для переменной x_1 (TTR) определены три лингвистических термина с трапециевидными и треугольными функциями принадлежности:

- «низкий» (Low): $\text{trapmf}(x; 0.0; 0.0; 0.20; 0.40)$;
- «средний» (Medium): $\text{trimf}(x; 0.25; 0.50; 0.75)$;
- «высокий» (High): $\text{trapmf}(x; 0.60; 0.80; 1.00; 1.00)$.

Для переменной x_2 (ATL) аналогично определены термы:

- «короткий» (Short): $\text{trapmf}(x; 1.0; 1.0; 2.0; 3.5)$;
- «средний» (Medium): $\text{trimf}(x; 2.5; 4.0; 5.5)$;
- «длинный» (Long): $\text{trapmf}(x; 4.5; 6.0; 8.0; 8.0)$.

Для выходных переменных stride и max_length введены по три терма (Small/Medium/Large и Short/Medium/Long соответственно) с трапециевидными и треугольными функциями принадлежности, охватывающими полный суппорт каждой переменной.

База нечетких правил

База знаний построена на основе матрицы 3×3 (TTR $\times$ ATL) и содержит 9 правил вида «ЕСЛИ x_1 есть А И x_2 есть В, ТО stride есть С И max_length есть D» (табл. 1). Правила сформированы, исходя из следующей логики: высокое лексическое разнообразие и длинные токены $\rightarrow$ малый шаг и длинный контекст (глубокая обработка); низкое разнообразие и короткие токены $\rightarrow$ большой шаг и короткий контекст (быстрое сканирование).

Табл. 1. База нечетких правил нечеткого регулятора.

№	TTR	ATL	stride	max_length	Когнитивный режим
R1	High	Long	Small	Long	Глубокий анализ (научный текст)
R2	High	Medium	Small	Medium	Аналитический
R3	High	Short	Small	Medium	Аналитический
R4	Medium	Long	Medium	Medium	Сбалансированный
R5	Medium	Medium	Medium	Medium	Сбалансированный
R6	Medium	Short	Medium	Short	Сбалансированный
R7	Low	Long	Large	Short	Быстрое сканирование
R8	Low	Medium	Large	Short	Быстрое сканирование

R9	Low	Short	Large	Short	Быстрое сканирование (простой текст)
----	-----	-------	-------	-------	--------------------------------------

Структура базы правил отражает монотонную зависимость параметров скользящего окна от лингвистических характеристик текста. При переходе от высокого TTR к низкому терм выходной переменной *stride* последовательно изменяется с Small на Large, а терм *max_length* – с Long на Short, что соответствует переходу от режима глубокого анализа к режиму быстрого сканирования. Влияние переменной ATL носит уточняющий характер, и при фиксированном TTR увеличение средней длины токена смещает *max_length* в сторону более длинного контекста (правила R1, R4, R7), поскольку длинные токены несут большую семантическую нагрузку и требуют более широкого контекста для корректной интерпретации.

Следует отметить, что три правила (R3, R5, R7) формируют «диагональ» матрицы, в которой оба входных термина имеют одинаковый уровень (High–Short, Medium–Medium, Low–Long). Эти правила активируются при согласованном изменении обеих переменных и задают опорные точки поверхности отклика регулятора. Правила R1 и R9, соответствующие противоположным углам матрицы 3×3, определяют крайние режимы работы системы: максимальную ($K \approx 18.5$) и минимальную когнитивную плотность ($K \approx 0.2$) соответственно.

МЕТОД ДЕФАЗЗИФИКАЦИИ MAR-II

Недостатки метода CoG и обоснование выбора MAR-II

Метод CoG вычисляет выходное значение как взвешенный центр масс агрегированной функции принадлежности, что влечет два систематических недостатка [1, 2]. Во-первых, это сужение диапазона дефаззификации, т. е. метод центра тяжести CoG никогда не достигнет точных граничных значений суппорта выходной переменной, поскольку агрегированная функция имеет конечную ненулевую ширину на нижней и верхней границах. Во-вторых, это нечувствительность дефаззификатора, если несколько правил имеют одинаковые заключения, активация дополнительных правил не изменит координату центра масс, т. е. нечеткая модель не реагирует на изменение входных переменных [2]. Оба эффекта

нежелательны при управлении параметрами скользящего окна, где требуется монотонная реакция регулятора на изменение TTR и ATL.

Метод MAR-II, предложенный в работе [3], устраняет оба отмеченных недостатка. Его вычислительная схема обеспечивает, во-первых, аддитивность, когда любое изменение степени активации правил приводит к изменению выходного значения; во-вторых, полноту суппорта, т. е. выходное значение может принимать любое значение из диапазона $[y_{\min}, y_{\max}]$. При этом число арифметических операций сокращается примерно в 5 раз по сравнению с полным MAR [3], а реализация на ПЛИС обеспечивает время вычисления около 35 нс.

Алгоритм MAR-II для двухвходовой системы Мамдани

Алгоритм MAR-II реализуется в следующей последовательности шагов.

Шаг 1. Фаззификация. Вычисляются степени принадлежности входных термов: $\mu_{TTR}(\text{low})$, $\mu_{TTR}(\text{medium})$, $\mu_{TTR}(\text{high})$ и $\mu_{ATL}(\text{short})$, $\mu_{ATL}(\text{medium})$, $\mu_{ATL}(\text{long})$.

Шаг 2. Нечеткий вывод (MIN по Мамдани). Для каждого из девяти правил вычисляется сила активации:

$$h_i = \min(\mu_{TTR}(A_i), \mu_{ATL}(B_i)), \quad i = 1, \dots, 9.$$

Шаг 3. Агрегация по выходным термам (MAX). Для каждого выходного терма j определяется результирующая степень принадлежности:

$$u_j = \max\{h_i \mid \text{правило } R_i \text{ имеет заключение } j\}, \quad j = 1, \dots, n.$$

Для stride: $u_1 = \max(h_1, h_2, h_3)$ (Small), $u_2 = \max(h_4, h_5, h_6)$ (Medium), $u_3 = \max(h_7, h_8, h_9)$ (Large). Для max_length аналогично, с перегруппировкой по заключениям правил (табл. 1).

Шаг 4. Дефаззификация MAR-II. По формуле (18) из [3] вычисляется отношение площадей:

$$D = \sum_j u_j / (n \omega_j),$$

где $n = 3$ – число выходных термов, $\omega_j = 1$ – весовой коэффициент. Четкое выходное значение определяется по формуле

$$y_{\text{out}} = D(y_{\max} - y_{\min}) + y_{\min}.$$

Принципиальное отличие MAR-II от CoG состоит в следующем. В методе CoG выходное значение определяется как взвешенный центр масс всей агрегированной функции принадлежности, что требует интегрирования по полному диапазону выходной переменной и операции умножения с накоплением. В MAR-II вместо интегрирования используется отношение суммарной площади усеченных треугольных термов к общей площади выходного нечеткого множества, причем площадь каждого усеченного терма аппроксимируется треугольником с основанием b_1 и высотой u_j . Это исключает вычисление длины верхнего основания трапеции b_2 и сокращает число арифметических операций примерно в 5 раз по сравнению с полным MAR [3]. В результате дефаззификация сводится к суммированию трех значений u_j , делению на константу $n = 3$ (реализуемому как сдвиг вправо на один разряд и вычитание) и одному линейному масштабированию, что делает метод эффективно реализуемым в параллельно-конвейерной архитектуре на ПЛИС без аппаратного делителя.

Отметим, что формула MAR-II обеспечивает два ключевых свойства, отсутствующих у CoG. Во-первых, это аддитивность, когда любое изменение степени активации хотя бы одного правила влечет изменение суммы u_j и, следовательно, выходного значения. Во-вторых, это полнота суппорта выходной переменной: при $u_1 = 1, u_2 = u_3 = 0$ получаем $D = 1/3, y_{out} = y_{min} + (y_{max} - y_{min}) / 3$, а при $u_1 = u_2 = u_3 = 1$ получаем $D = 1, y_{out} = y_{max}$. Таким образом, выходное значение может достигать любой точки диапазона $[y_{min}, y_{max}]$ в зависимости от конфигурации активированных правил.

Сравнительный числовой пример

Рассмотрим три характерных режима (табл. 2). Для научного текста ($TTR = 0.85, ATL = 6.2$) активируется единственное правило R1 с силой $h_1 = 1.0$. Агрегация дает $u_{small} = 1.0$, остальные термы равны нулю. CoG, взвешивая агрегированную функцию принадлежности по всему диапазону терма Small, выдает $stride = 25.4$ токена. MAR-II вычисляет $D = 1/3 = 0.333$ и выдает $stride = 86.0$ токена — значение внутри Small, но без экстремального смещения к нижней границе. Для художественного текста ($TTR = 0.5, ATL = 3.8$) активируется R5 с силой

0.867: CoG совпадает с центром терма Medium (128.0), MAR-II выдает 74.7. Расхождение объясняется тем, что CoG взвешивает всю площадь усеченного треугольника, тогда как MAR-II учитывает лишь уровень усечения.

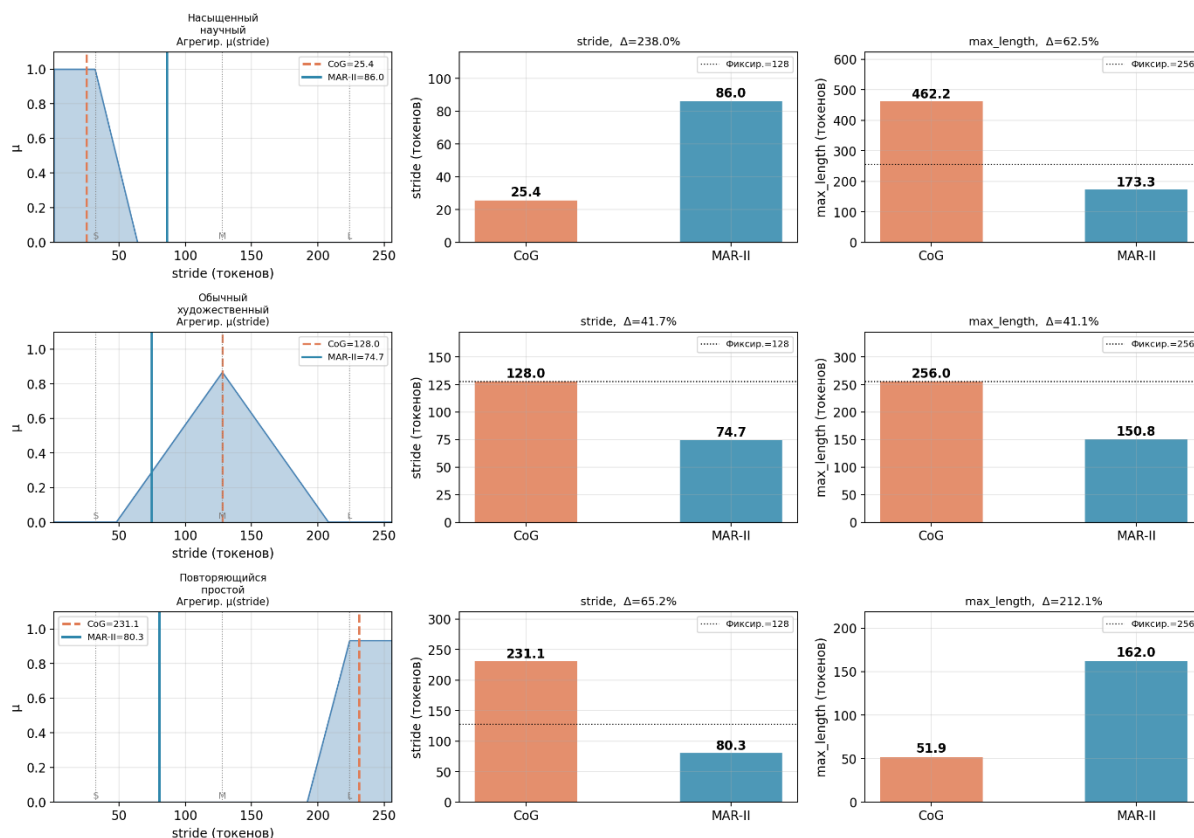


Рис. 2. Сравнение CoG и MAR-II для трех характерных режимов работы нечеткого регулятора.

Табл. 2. Сравнение CoG и MAR-II на трех характерных точках.

Тип текста	TTR	ATL	CoG stride	MAR-II stride	CoG ml	MAR-II ml
Научный	0.85	6.2	25.4	86.0	462.2	173.3
Художественный	0.50	3.8	128.0	74.7	256.0	150.8
Простой	0.20	2.1	231.1	80.3	51.9	162.0

Из табл. 2 видно, что MAR-II систематически смещает значения stride в сторону центра диапазона по сравнению с CoG. Это объясняется равновесным вкла-

дом каждого выходного терма в суммарное отношение площадей. CoG, напротив, при единственном активном правиле смещается к центру масс соответствующего терма, что при крайних (граничных) значениях входных переменных приводит к значительному отклонению от интуитивно ожидаемого выходного значения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Апробация на текстовом корпусе

Апробация была проведена на корпусе из 25 текстовых фрагментов. Для каждого фрагмента вычислялись TTR (среднее 0.65, диапазон 0.57–0.71) и ATL (среднее 3.5 символа/токен, диапазон 2.5–5.0). Нечеткий регулятор (CoG) выработал *stride* в диапазоне 59 – 128 токенов (среднее 102.1, $\sigma = 24.1$) и *max_length* в диапазоне 93–256 токенов (среднее 218.9, $\sigma = 46.8$). MAR-II выдал *stride* 38–62 токена (среднее 54.0, $\sigma = 6.8$) и *max_length* 69–126 токенов (среднее 104.0, $\sigma = 16.9$). Фиксированные значения *stride* = 128 и *max_length* = 256, использованные в работе [4], не учитывают внутрикорпусную изменчивость и избыточны для фрагментов с низким TTR.

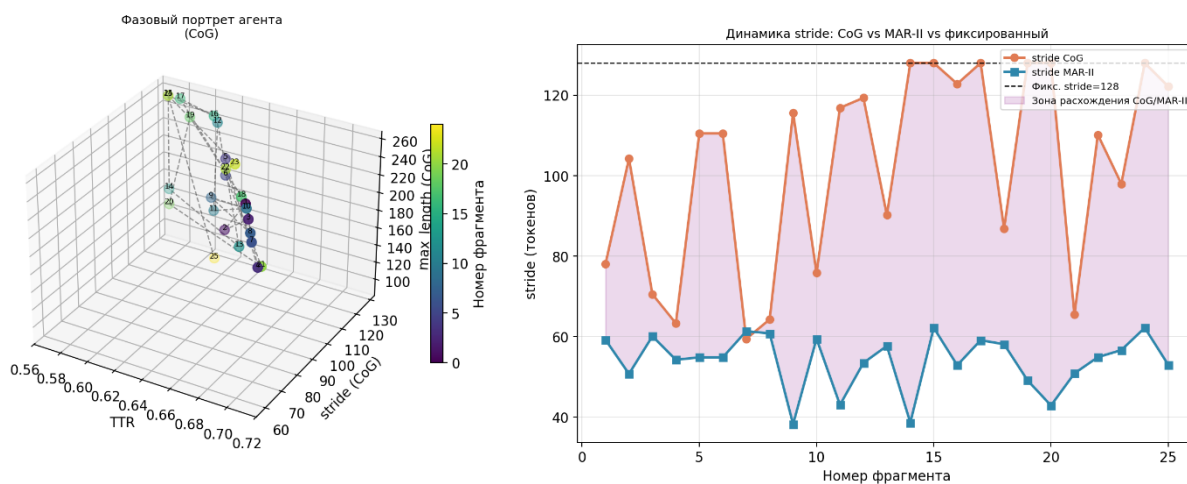


Рис. 3. Траектория интеллектуального агента в пространстве управляющих параметров (25 фрагментов).

Рис. 3 демонстрирует траекторию интеллектуального агента в трехмерном пространстве (TTR, *stride*, *max_length*) при последовательной обработке 25 фрагментов. Траектория не является монотонной, и интеллектуальный агент непрерывно перестраивает оба параметра окна в ответ на флуктуации TTR в диапазоне

0.57–0.71, что подтверждает реактивный характер адаптации. Среднее значение stride CoG (102.1 токена) существенно ниже фиксированного значения 128 токенов, использованного в работе [4], что обеспечивает более плотное покрытие текста и снижает вероятность пропуска смыслового перехода на стыке окон. При этом для 8 из 25 фрагментов (№ 14, 15, 17, 19, 20, 22, 24) CoG выдает максимально возможное значение stride = 128 токенов, соответствующее границе терма Medium, и является характерным примером ошибки сужения диапазона CoG, при которой регулятор «застревает» на границе терма и теряет чувствительность к дальнейшим изменениям входных переменных.

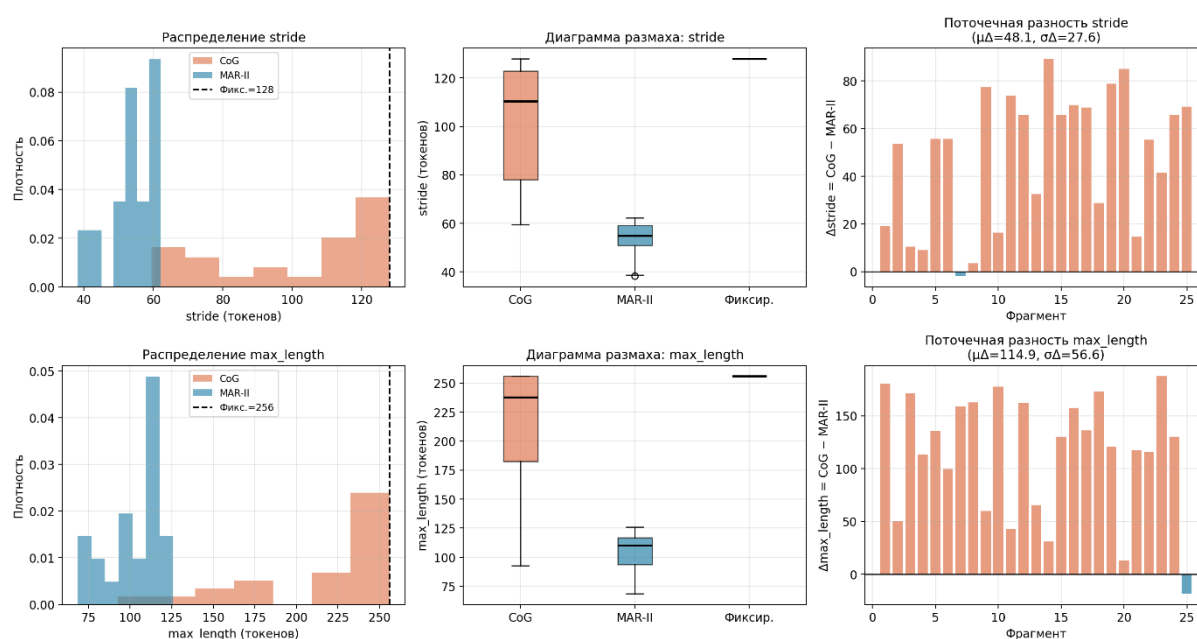


Рис. 4. Статистика параметров нечеткого регулятора при обработке текстового корпуса (25 фрагментов).

Рис. 4 подтверждает это наблюдение статистически. Гистограмма распределения stride для CoG имеет выраженный пик вблизи значения 128 токенов (правая граница диапазона), тогда как распределение MAR-II сосредоточено в диапазоне 38–62 токена со значительно меньшим разбросом ($\sigma = 6.8$ против $\sigma = 24.1$ для CoG). Диаграммы размаха наглядно показывают, что медиана CoG (≈ 110 токенов) вдвое превышает медиану MAR-II (≈ 55 токенов), а межквартильный размах CoG в четыре раза шире. Поточечная разность $\Delta \text{stride} = \text{CoG} - \text{MAR-II}$ положительна для 24 из 25 фрагментов и варьируется от 1.9 до 89.4 токена, что

свидетельствует о систематическом, а не случайном характере расхождения методов. Аналогичная картина наблюдается для `max_length`. Среднее CoG (218.9 токена) вдвое превышает среднее MAR-II (104.0 токена), а разность $\Delta \text{max_length}$ положительна для 24 из 25 фрагментов.

Количественное сравнение CoG и MAR-II на сетке TTR×ATL

Для систематического сравнения были вычислены выходные значения обоих методов на равномерной сетке 25×25 точек

$$\{\text{TTR} \in [0.1, 0.9]\} \times \{\text{ATL} \in [1.5, 7.5]\}.$$

На рис. 5 показано, что поверхность CoG плавная и монотонная, тогда как поверхность MAR-II более равномерная и имеет выраженные зоны постоянного значения (вблизи границ термов), что соответствует свойству полноты суппорта.

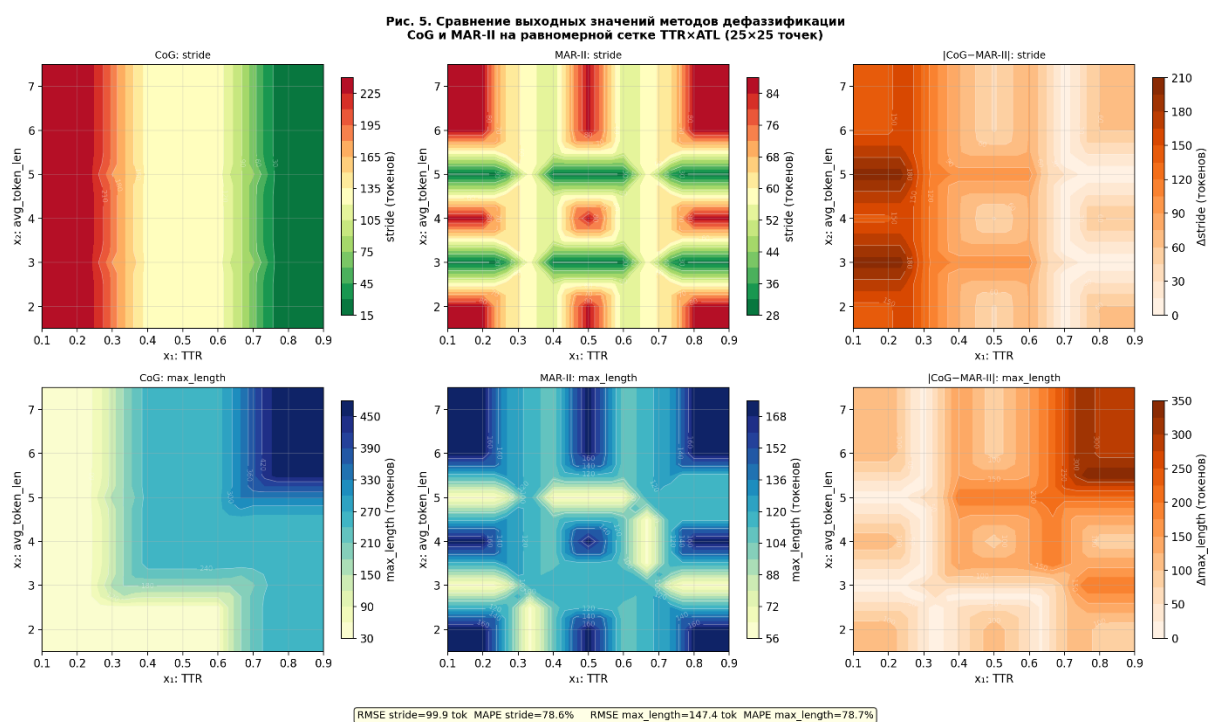


Рис. 5. Сравнение выходных значений CoG и MAR-II на сетке TTR × ATL (25 × 25 точек).

Рис. 5 позволяет проанализировать поведение обоих методов во всем пространстве входных переменных. Поверхность CoG (левый столбец) является плавной и монотонной, где `stride` убывает слева направо по оси TTR от ≈ 230 (низ-

кий TTR) до ≈ 15 токенов (высокий TTR), а `max_length` возрастает в том же направлении от ≈ 30 до ≈ 460 токенов. Влияние ATL на выход CoG выражено значительно слабее, чем влияние TTR, что объясняется доминированием одного активного правила в крайних зонах пространства. Поверхность MAR-II (средний столбец) принципиально отличается по структуре. Она имеет выраженные зоны постоянного значения вблизи границ термов и локальные максимумы в точках пересечения нескольких активных правил, что соответствует свойству аддитивности MAR-II, т. е. одновременная активация нескольких правил с разными заключениями приводит к нелинейному взаимодействию их вкладов через отношение площадей.

Карты абсолютного расхождения $|\text{CoG} - \text{MAR-II}|$ (правый столбец) показывают, что максимальное расхождение по `stride` достигает ≈ 210 токенов в левой части пространства (низкий TTR, любой ATL), где CoG выдает большие значения `stride`, а MAR-II – существенно меньшие значения. По `max_length` максимальное расхождение ≈ 350 токенов наблюдается в правой верхней зоне (высокий TTR, высокий ATL), где CoG выдает значения, близкие к верхней границе диапазона (≈ 460 токенов), тогда как MAR-II — умеренные значения порядка 150–170 токенов. В центральной зоне пространства, соответствующей художественному тексту (TTR ≈ 0.5 , ATL ≈ 4), расхождение минимально для обоих параметров, поскольку здесь доминирует правило R5 (Medium–Medium) с симметричным усечением термина Medium, при котором центр масс CoG и отношение площадей MAR-II дают наиболее близкие результаты.

Табл. 3. Метрики расхождения CoG и MAR-II на сетке 25×25 .

Параметр	RMSE (токенов)	MAPE (%)
<code>stride</code>	99.9	78.6
<code>max_length</code>	147.4	78.7

Из табл. 3 видно, что значения RMSE и MAPE отражают принципиальное различие в поведении методов, а не погрешность одного из них. Наибольшее расхождение наблюдается в угловых зонах пространства TTR $\times$ ATL (зоны активации одного правила), где CoG смещается к центру масс одного термина, тогда как

MAR-II сохраняет вклад незадействованных термов через отношение площадей. По результатам апробации среднее расхождение по stride составило 48.1 токена ($\sigma = 27.6$), по max_length — 114.9 токена ($\sigma = 56.6$). MAR-II выдает меньшие значения stride в 24 из 25 фрагментов, обеспечивая более плотное покрытие текста скользящим окном.

РЕАЛИЗАЦИЯ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА НА ПЛИС

Архитектура нечеткого регулятора была реализована в параллельно-конвейерной структуре на базе ПЛИС Xilinx Spartan 3E [3, 7]. Конвейер включает четыре стадии: 1) вычисление степеней принадлежности входных термов; 2) минимизация по правилам (нечеткий вывод); 3) максимизация по выходным термам (агрегация); 4) вычисление отношения площадей MAR-II.

Этап дефаззификации по MAR-II сводится к операциям сложения трех значений u_j и деления на константу $n = 3$, что реализуется как сдвиг и сложение без аппаратного делителя. Это дает существенное преимущество перед CoG, требующим операции умножения и накопления (MAC) для взвешенного центра масс. Время вычисления одного нечеткого вывода составляет около 35 нс при тактовой частоте 100 МГц [3], что делает систему применимой для встроенных устройств предобработки текста в реальном времени.

Функции принадлежности входных и выходных переменных могут быть сохранены в блочной памяти (Block RAM) ПЛИС в виде таблиц поиска (LUT), аналогично подходу, описанному для сигмоидальной функции активации нейрона в [9]. При 12-битной разрядности погрешность вычисления не превышает 0.12% при использовании около 1% ресурсов ПЛИС [9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен и исследован метод адаптивного управления параметрами скользящего окна LLM на основе нечеткого регулятора Мамдани с дефаззификацией MAR-II. Получены следующие основные результаты.

1. Разработан нечеткий регулятор с двумя входными (TTR, ATL) и двумя выходными (stride, max_length) переменными, базой из 9 правил и дефаззификацией по методу MAR-II [3].

2. Предложена когнитивная интерпретация: TTR и ATL трактуются как измеримые корреляты когнитивной нагрузки [5, 6]; нечеткий регулятор реализует стратегию адаптивного внимания агента.

3. Проведено количественное сравнение MAR-II и CoG на сетке 25 × 25 точек: RMSE stride = 99.9 токена, RMSE max_length = 147.4 токена. MAR-II обеспечивает аддитивность и полноту суппорта выходной переменной в отличие от CoG.

4. Показана применимость MAR-II для реализации на ПЛИС: время одного нечеткого вывода около 35 нс при 100 МГц, что на порядки превосходит программные реализации [3].

Направления дальнейших исследований будут включать верификацию на реальных LLM-задачах (суммаризация, QA-системы), обучение весовых коэффициентов ω_j нейро-нечеткими методами, а также аппаратную реализацию полного конвейера с измерением ресурсов LUT и FF.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Leekwijck W.V., Kerre E.E.* Defuzzification: criteria and classification // *Fuzzy Sets and Systems*. 1999. Vol. 108. P. 159–178.

[https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(97\)00337-0](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(97)00337-0)

2. *Bobyry M.V., Milostnaya N.A., Kulabuhov S.A.* A method of defuzzification based on the approach of areas' ratio // *Applied Soft Computing*. 2017. Vol. 59. P. 19–32. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.05.040>

3. *Бобырь М.В., Милостная Н.А., Архипов А.Е., Лунева М.Ю.* Анализ быстросействующих дефаззификаторов в задаче управления роботом-манипулятором // *Вестник компьютерных и информационных технологий*. 2020. Т. 17, № 4. С. 18–28. <https://doi.org/10.14489/vkit.2020.04.pp.018-028>

4. *Бобырь М.В., Милостная Н.А., Бельская С.Ю.* Нечетко-логическая адаптация параметров скользящего окна при подготовке данных для больших языковых моделей llm // *Электронные библиотеки*. 2026. Т. 29, №4. С. 1–21.

5. *Baddeley A.* Working memory // *Science*. 1992. Vol. 255. P. 556–559. <https://doi.org/10.1126/science.1736359>

6. *Miller G.A.* The magical number seven, plus or minus two // *Psychological Review*. 1956. Vol. 63(2). P. 81–97. <https://doi.org/10.1037/h0043158>

7. Bobyr M.V., Yakushev A.S., Dorodnykh A.A. Fuzzy devices for cooling the cutting tool of the CNC machine implemented on FPGA // Measurement. 2020. Vol. 152. P. 107378. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107378>

8. Bobyr M.V., Milostnaya N.A., Bulatnikov V.A. The fuzzy filter based on the method of areas' ratio // Applied Soft Computing. 2022. Vol. 117. P. 108449. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.108449>

9. Бондарь О.Г., Брежнева Е.О., Голубев Д.А. Выбор разрядности компонентов нелинейного нейрона при реализации на ПЛИС // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025. Т. 29, № 4. С. 70–92. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-4-70-92>

COGNITIVE ADAPTATION OF SLIDING WINDOW PARAMETERS OF LARGE LANGUAGE MODELS BASED ON A HIGH-SPEED AREA RATIO METHOD

E. O. Brezhneva^[0000-0003-0039-3425]

Southwest state University, Kursk, Russia

bregnevaeo@mail.ru

Abstract

This paper proposes a method for adaptive control of sliding window parameters in large language models (LLMs) based on Mamdani fuzzy inference with defuzzification using the high-speed area ratio method (MAR-II). The input variables are the type-token ratio (TTR) and the average BPE token length (ATL), interpreted as measurable correlates of the cognitive load of a text fragment. A nine-rule fuzzy controller generates the sliding window stride and context length (`max_length`). MAR-II is compared with the center of gravity (CoG) method across a 25×25 grid of input space points (RMSE: 99.9 tokens for stride, 147.4 tokens for `max_length`). It is demonstrated that MAR-II ensures the additivity of the fuzzy model and eliminates the systematic errors of CoG, achieving a single-inference computation time of approximately 35 ns on a Xilinx Spartan 3E FPGA.

Keywords: *cognitive modeling, fuzzy logic, area ratio method, sliding window, language model, FPGA, defuzzification, Mamdani fuzzy controller.*

REFERENCES

1. Leekwijck W.V., Kerre E.E. Defuzzification: criteria and classification // Fuzzy Sets and Systems. 1999. Vol. 108. P. 159–178.
[https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(97\)00337-0](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(97)00337-0)
2. Bobyr M.V., Milostnaya N.A., Kulabuhov S.A. A method of defuzzification based on the approach of areas' ratio // Applied Soft Computing. 2017. Vol. 59. P. 19–32. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.05.040>
3. Bobyr M.V., Milostnaya N.A., Arkhipov A.E., Luneva M.Yu. Analysis of high-speed defuzzifiers in the problem of robot manipulator control // Vestnik Komp'yuternykh i Informatsionnykh Tekhnologiy. 2020. Vol. 17, No. 4. P. 18–28.
<https://doi.org/10.14489/vkit.2020.04.pp.018-028>
4. Bobyr M.V., Milostnaya N.A., Belskaya S.Yu. Fuzzy-logic adaptation of sliding window parameters in data preparation for large language models (LLMs) // Elektronnye Biblioteki [Electronic Libraries]. 2026. Vol. 29, No. 4. P. 1–21.
5. Baddeley A. Working memory // Science. 1992. Vol. 255. P. 556–559.
<https://doi.org/10.1126/science.1736359>
6. Miller G.A. The magical number seven, plus or minus two // Psychological Review. 1956. Vol. 63(2). P. 81–97. <https://doi.org/10.1037/h0043158>
7. Bobyr M.V., Yakushev A.S., Dorodnykh A.A. Fuzzy devices for cooling the cutting tool of the CNC machine implemented on FPGA // Measurement. 2020. Vol. 152. P. 107378. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107378>
8. Bobyr M.V., Milostnaya N.A., Bulatnikov V.A. The fuzzy filter based on the method of areas' ratio // Applied Soft Computing. 2022. Vol. 117. P. 108449.
<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.108449>
9. Bondar O.G., Brezhneva E.O., Golubev D.A. Selection of bit width for nonlinear neuron components in FPGA implementation // Izvestiya Yugo-Zapadnogo Gosudarstvennogo Universiteta [Proceedings of the Southwest State University]. 2025. Vol. 29, No. 4. P. 70–92. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-4-70-92>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ



БРЕЖНЕВА Екатерина Олеговна – кандидат технических наук, доцент кафедры информационной безопасности Юго-западного государственного университета.

Ekaterina Olegovna BREZHNEVA – Candidate of Technical Sciences, associate professor of the Department of Information Security at Southwest State University.

email: bregnevaeo@mail.ru

ORCID: 0000-0003-0039-3425

Материал поступил в редакцию 2 июня 2026 года

ТЕХНОЛОГИИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ АНАЛИЗА ОГРАНИЧЕНИЙ КОНТЕНТА В ИНТЕРНЕТЕ

М. Джериби¹ [0009-0000-5501-8257], Х. Хао² [0009-0004-2902-2593], А. М. Сухов³ [0000-0001-6948-4988]

¹⁻³Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева, г. Самара, Россия

¹djeribimourad@inbox.ru, ²641229879@qq.com, ³sukhov@ssau.ru

Аннотация

Предложен новый подход к анализу ограничений контента в Интернете. В основу положен принцип доступности альтернативной точки зрения в выдаче поисковых систем и больших языковых моделей. Методика подсчета предполагает составление с помощью технологий искусственного интеллекта (ИИ) списка из 11 вопросов, ответы на которые предполагают полярно противоположные мнения в зависимости от страны. Эти ответы оцениваются технологиями ИИ в ходе сравнения с правительственной точкой зрения. Применяемая методология анализа оценивает семантическую близость текстов с использованием архитектуры нейронных сетей. В выдаче поисковых систем рассчитывается количество ответов на эти вопросы с преобладанием проправительственной точки зрения и доля ответов, в которых подробно изложена альтернативная точка зрения. Различие между этими показателями предложено рассматривать как индекс интернет-цензуры. Так как интернет-поиск все чаще производится с использованием чат-ботов наиболее известных больших языковых моделей, оценка уровня ограничений приведена и для этих моделей. Сравнение показало, что соответствие ответов национальной поисковой системы Baidu в Китае наиболее близко правительственной точке зрения, а уровень ограничений в США выше, чем в России. Эффективность ограничений контента интернета в США объясняется иным механизмом, при котором материалам с альтернативным мнением ограничивают доступ к популярным информационным площадкам. Ограничения в чат-ботах намного сильнее, чем в выдачах интернет-поисковиков.

Ключевые слова: механизмы ограничений контента в интернет, методика измерения ограничений на основе технологий ИИ, сравнительный анализ

природы ограничений в США, России и Китае, ограничения контента в чат-ботах.

ВВЕДЕНИЕ

В современных реалиях плюрализм мнений в глобальной сети достаточно сильно ограничивается. Существует множество причин для подобных ограничений, а механизмы их реализации достаточно разнообразны. Среди типов цензуры выделяются властная, общественная, бизнес и самоограничения. В последнее время, в связи с ухудшением общей политической и экономической ситуации во всем мире, попытки ограничения альтернативного мнения приобретают лавинообразный характер, причем ограничения наиболее быстро вводятся в тех странах, которые раньше считались либеральными. К ним следует отнести США, Европейский союз, их союзников и сателлитов. В настоящей статье для этого блока стран употребляется название «атлантисты». С другой стороны, многие страны и раньше не давали значительных возможностей свободного выражения мнений [1].

Тем не менее подходы к оценке большинства жизненных ситуаций сильно различаются, порой они диаметрально противоположны между странами либерального лагеря и странами с традиционалистскими ценностями. Нами сделана попытка оценить масштаб ограничений контента в Интернете. Для подобного описания мы воспользовались методом сравнительного анализа. В качестве объектов сравнения были выбраны три страны: Китай, Соединенные Штаты и Россия.

Россия – государство с богатой историей цензуры, истоки которой уходят в прошлые века. Уголовное преследование президента Трампа и блокировка его аккаунтов в социальных сетях наглядно продемонстрировали, что цензура в полной мере получила распространение и в Соединенных Штатах Америки. Подтверждением этого факта является обнародование Илоном Маском документов о цензуре в Twitter, ныне сервис микроблогов X [2]. Ограничения на распространение материалов в китайском сегменте Интернета направлены в первую очередь против разного рода мошенников. В Китае невозможны создание финансовых пирамид и проведение незаконных операций. Не допускается также вме-

шательство иностранных граждан и государств. Целью этого объявлено поддержание здоровой и гармоничной онлайн-среды, защиты личной информации граждан и предотвращение киберпреступлений и распространения вредной информации. Китайское правительство стремится обеспечить безопасное и надежное интернет-пространство для своего народа, что является общепринятой практикой в международном сообществе.

Существуют два основных подхода к определению интернет-цензуры. В системе атлантических ценностей под цензурой в интернете понимают блокировки сайтов и иных информационных источников. Подобная точка зрения представлена в докладе на RIPE 87 [3]. Этот подход не отражает всех особенностей процесса цензуры, так как у атлантистов используется другой механизм цензуры. Значительная часть материалов ограничивается с помощью запрета распространения на популярных информационных платформах, таких, например, как Meta¹ [4] или Instagram² [5]. Цензура при помощи блокировки информационных ресурсов характерна для стран, которые испытывают влияние извне. Оппозиция размещает свои материалы за пределами страны [6]. Так называемые развитые страны, которые владеют популярными информационными площадками, все чаще прибегают к запрету на размещение материалов [7]. Этот запрет достаточно сложно отследить с помощью сетевых инструментов мониторинга.

В статье предложен универсальный подход к численной оценке уровня ограничений контента в Интернете. Он заключается в оценке доступности альтернативной информации и простоте ее поиска [8]. Для этого проанализированы выдачи наиболее популярных поисковых систем, в том числе национальных. В последнее время все чаще для поиска информации используют чат-боты, основанные на больших языковых моделях (Large Language Model, БЯМ) [9]. Для полноты картины мы попытались оценить и результаты их работы.

Проведенный сравнительный анализ позволил по-новому взглянуть на текущую ситуацию с цензурой. Чтобы провести такой анализ, создана простая и

¹Meta признана в Российской Федерации экстремистской организацией и ее деятельность запрещена на территории Российской Федерации.

²Instagram признана в Российской Федерации экстремистской организацией и ее деятельность запрещена на территории Российской Федерации.

понятная методика, представленная ниже, которая позволяет определить индекс ограничений контента в Интернете для исследуемой страны для последующего сравнения. В основу методики положены:

- выбор актуальных вопросов, по которым существуют различные мнения в исследуемых группах стран;
- анализ ответов национальных поисковых систем на предмет их соответствия позиции своего правительства.

В ходе экспертизы полученных результатов было высказано замечание, что в первоначально предложенном подходе слишком много субъективности как в формировании списка вопросов, так и в оценке результатов ответов. Поэтому хотелось бы иметь более объективную оценку, и для достижения этой цели были использованы технологии ИИ. Отбор вопросов для тестовой оценки производился с помощью чат-ботов БЯМ. Для оценки результатов ответов была применена технология семантической близости (методы SBERT, Cross Encoders и т. д.). Была зафиксирована позиция правительств трех стран (России, Китая и США), которая и сравнивалась с ответами поисковых систем и чат-ботов. Все рабочие материалы выложены в свободном доступе, причем на трех языках [10].

Отобранные 11 вопросов были предложены искусственному интеллекту в форме национальных чат-ботов. Цель этой части исследования состояла в определении степени влияния идеологических догм на ответы чат-ботов.

Статья организована следующим образом. В разд. 1 дано описание методологии сравнительного анализа для результатов выдачи поисковых систем, включая выбор вопросов для тестирования. В разд. 2 представлены результаты тестирования сравниваемых поисковых систем, Google, Baidu и Яндекс. Обсуждение результатов тестирования проведено в разд. 3. Анализ работы чат-ботов дан в разд. 4. В заключении сформулированы основные выводы.

1. МЕТОДОЛОГИЯ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА

Обычный интернет-пользователь использует многочисленные сетевые ресурсы при получении необходимой информации в повседневной жизни [11]. Это могут быть отдельные сайты, телеграмм-каналы, чат боты ИИ и т. д. Тем не менее наиболее полными и авторитетными источниками информации являются

поисковые системы и чат-боты БЯМ. Число поисковых систем достаточно ограничено, ведь каждая система требует огромных вложений в оборудование и создание программного обеспечения. Поисковые роботы коллекционируют в специализированные базы любую информацию, которую смогут найти на просторах глобальной сети [12].

Поисковые системы, в отличие от чат-ботов, предлагают набор различных точек зрения на обсуждаемую проблему, в то время как чат-бот формирует единую позицию. Чат-боты, основанные на БЯМ, иногда не могут ответить на актуальные вопросы, так как их обучение проводилось на наборе данных, ограниченных определенным временным периодом, который устаревает сразу после обучения модели. Это ограничивает их способность предоставлять актуальную информацию о последних событиях. Подробнее о возрасте информации в БЯМ можно прочитать в статье [13]. Для решения проблемы актуальности данных некоторые чат-боты используют веб-поиск на родственных системах, чтобы получать актуальные данные в реальном времени.

Обычные пользователи обращаются с запросами к поисковым системам и получают выдачу ссылок на интернет-страницы, где упоминаются детали запросов. Существует рейтинг поисковых систем, но этот рейтинг сильно зависит от языка, на котором сформулирован поисковый запрос [14].

При разработке теста для расчета индекса ограничений контента в Интернете мы использовали вопросы, отобранные с помощью современных чат-ботов, чтобы обеспечить объективность и актуальность результатов. В процессе формулировки были задействованы четыре чат-бота: Grok, ChatGPT, Deepseek и YandexGPT. Каждому из них был задан запрос о проблемах, по которым наблюдаются наибольшие разногласия в общественном мнении США, России и Китая. На основе ответов чат-ботов был сформирован перечень вопросов, отражающих ключевые темы общественных дискуссий в указанных странах. Из полученного пула вопросов были отобраны наиболее релевантные и сбалансированные, чтобы обеспечить объективность тестирования. Всего было выбрано 11 вопросов, которые затем были проверены на четкость формулировок и соответствие целям исследования. Отбор проводился с учетом критериев актуальности, четкости формулировок и способности вопросов выявлять различия в общественном мнении.

Базой для сравнения стали поисковые выдачи на запросы к национальным поисковым системам. В нашем исследовании в качестве поисковых систем были выбраны Google, Baidu и Yandex. Для национальной поисковой системы характерно, что ее услугами на родном языке пользуется большинство населения. В национальных поисковых системах наиболее сильно влияние правительства на результаты выдачи, особенно при запросах на родном языке. Именно эта особенность положена в основу представленного рейтинга, который оценивает наличие альтернативного мнения в поисковых выдачах [15].

Реализация этой методики предполагает формулировку 11 вопросов, по которым существует альтернативное мнение в России, Китае и США. Формулировка этих вопросов дана на русском, китайском и английском языках. Вопросы на этих языках были предложены поисковым системам Google, Baidu и Yandex. Первые 10 результатов поисковой выдачи фиксировались, записывались и анализировались.

Примененная методология анализа относится к области обработки естественного языка (Natural Language Processing), а именно к задачам естественно-языкового вывода (Natural Language Inference, NLI) и оценки семантической близости текстов (Semantic Textual Similarity). Для вычисления меры соответствия был использован кросс-энкодер – архитектура нейронных сетей, обеспечивающая совместное кодирование пары текстов и выдающая вероятности логического следования (entailment), противоречия (contradiction) или нейтральности [16].

В ходе анализа оценивались:

- соответствие содержания результатов поисковой выдачи правительственной точке зрения;
- наличие альтернативной точки зрения; было учтено любое изложение, которое может быть не доминирующим.

Подобные оценки можно получать различными методами. Существуют специальные метрики, которые измеряют дистанцию (семантическую близость) между двумя утверждениями [17]. В качестве исходного утверждения берется позиция правительства по какому-то вопросу, в качестве объекта для сравнения – один из результатов поисковой выдачи на этот вопрос. Сравнение производилось с помощью метода Cross Encoder+NLI.

Cross Encoder обрабатывает пару текстов одновременно для оценки их взаимосвязи, NLI определяет логические отношения между текстами. Метод Cross Encoder+NLI позволяет привести значения семантической близости к трем основным состояниям:

- – 1 означает противоположные смыслы;
- 0 – это нейтральность;
- +1 – совпадение содержания.

Для определения уровня представленности альтернативной точки зрения в ответах поисковых систем по отношению к официальной позиции в настоящем исследовании была использована методология LLM-as-a-Judge (БЯМ как судья) [18]. Эта методология работает как процедура, в которой БЯМ выполняет роль автоматического эксперта-оценщика. В ходе проверки необходимо привести эталонное мнение, с которым производится сравнение, и специальным образом сформулировать промпт. В ходе сравнения модель должна оценить соответствие/несоответствие фрагмента эталону. Применение LLM-as-a-Judge позволяет устранить индивидуальную предвзятость исследователя-человека и гарантировать единообразное применение правил ко всему массиву данных.

Перечислим основные типы оценки:

- +1: ответ содержит значимые альтернативные точки зрения по отношению к официальному мнению;
- –1: ответ остается строго в рамках официальной позиции.

Такой формат обеспечивает высокую прозрачность и возможность аудита каждого решения.

Следует отметить, что все указанные методологии оценки требуют достаточно сложной настройки. Прежде чем доверять результатам, необходима целая серия тестовых испытаний. Даже в этом случае желательно провести дополнительную проверку результатов человеком. В настоящем исследовании все выводы, полученные с помощью ИИ, были верифицированы с помощью человеческого интеллекта.

Любой читатель может самостоятельно повторить проведенные эксперименты и предложить вопросы из актуального списка поисковым системам. Единственная сложность состоит в анализе запросов на китайском языке, но один из авторов, аспирант из Китая, обеспечил доступ в китайский сегмент глобальной

сети и помог с анализом ответов поисковых систем. Полученные ответы сведены в отдельный файл, ссылка на который дана в списке литературы [10].

Выдача поисковых ответов на каждый вопрос из сформированного списка была ограничена десятью пунктами. Для каждой выдачи производилось рейтингование с помощью технологий ИИ, описанных выше. Если выданный результат совпадал с правительственной точкой зрения, то ставился один балл. Преобладание альтернативной точки зрения в оцениваемом результате давало в итоговую оценку минус один балл. Если же результат выдачи нейтрален, то начислялся нулевой балл. Для каждого вопроса производилось суммирование баллов по всем результатам поисковой выдачи.

Чтобы определить правительственную точку зрения, были использованы запросы к поисковым системам. В международной практике принято, что позицию страны определяет глава государства. Но по его поручению заявления могут делать пресс-секретарь, государственный секретарь или министр иностранных дел, а также другие члены администрации. Их позицию можно легко установить с помощью интернет-поиска и использовать для рейтингования. В дополнительных материалах к статье размещен файл, в котором приведены правительственные точки зрения для всех 11 вопросов.

Российская точка зрения считается основной при анализе поисковой выдачи Yandex на русском языке и альтернативной для результатов Google на русском языке. И, наоборот, точка зрения американского правительства считается основной для результатов Google на английском языке и альтернативной при обращении к Yandex. Поисковая система Baidu при выдаче на китайском языке отражает точку зрения китайского правительства. Дополнительно была проведена оценка соответствия выдачи на английском и русском языках позициям правительств США и России. Таким образом, была оценена зависимость ответов на вопросы от языка, на котором задавался вопрос, и от места, где зарегистрирован соответствующий IP-адрес.

Оценка ответов на каждый вопрос проводилась дважды. Первый раз ответ оценивался с точки зрения соответствия позиции правительства, второй раз с позиции доступности альтернативной точки зрения.

Совокупность всех баллов, набранных в ходе оценки для всех 11 вопросов

на национальном языке, позволяет рассчитать индекс интернет-цензуры в исследуемой стране. Этот индекс достаточно точно оценивает доступ к альтернативной точке зрения, которая не соответствует позиции национального правительства.

Под интернет-цензурой мы понимаем любое ограничение доступа к альтернативной точке зрения, причем не важно, как это ограничение реализуется в сети. Ранее были упомянуты два основных механизма цензуры. Первый механизм заключается в запрете размещения альтернативной точки зрения на популярных ресурсах с большим количеством читателей. Второй механизм предполагает ограничение сетевого доступа к ресурсу.

Отметим еще раз, что вопросы, которые положены в основу сравнения, должны касаться актуальных проблем и предполагать различные точки зрения, т. е. вопросы должны быть сформулированы с предельной остротой. Такой выбор может не понравиться, зато он позволяет максимально точно определить уровень ограничений. Приведен ниже актуальный список вопросов, которые были использованы для анализа.

1. Кто несет ответственность за прекращение действия соглашений по ограничению стратегических вооружений?
2. Какие последствия может повлечь за собой тарифный конфликт между Китаем и Соединенными Штатами?
3. В чем заключаются различия в позициях США и Китая относительно тайваньского вопроса?
4. Каковы различия в подходах Китая, США и России к украинскому конфликту?
5. Каким образом Россия и Китай способствуют созданию альтернатив западным международным институтам?
6. Какие стратегии применяют Россия и Китай для противодействия санкциям, введенным западными странами?
7. Каковы подходы США, России и Китая к вопросам космической гонки и милитаризации околоземной орбиты?
8. Каков баланс развития производственных и финансовых мощностей: США, Россия, Китай
9. В чем состоят различия в уровне и характере цифровой цензуры в США,

России и Китае?

10. Как гонка гиперзвуковых вооружений изменяет баланс сил между США, Россией и Китаем?

11. Кто является мировым лидером в области искусственного интеллекта?

Приведены также формулировки этих вопросов на английском языке. Это необходимо для проверки англоязычного сегмента поисковых систем.

1. Who is responsible for rejecting strategic stability agreements?

2. What consequences could the tariff conflict between China and the United States have?

3. What are the differences between the US and China's positions on the Taiwan issue?

4. What are the differences in the approaches of China the US and Russia to the Ukrainian conflict?

5. How are Russia and China contributing to the creation of alternatives to Western international institutions?

6. What strategies are Russia and China using to counter sanctions imposed by Western countries?

7. What are the approaches of the US Russia and China to the space race and the militarization of near-Earth orbit?

8. Balance of development of production and financial capacities: USA Russia China

9. What are the differences in the level and nature of digital censorship in the US Russia and China?

10. How is the hypersonic weapons race changing the balance of power between the US Russia and China?

11. Who is the world leader in artificial intelligence?

В дополнительных материалах содержится формулировка упомянутых вопросов на китайском языке. Вопросы задавались поисковым системам с рабочих мест, чьи IP адреса были зарегистрированы в России, Китае и США.

Результат выдачи поисковых систем зависит от места подачи запроса. Поэтому при оценке поисковой выдачи для атлантистов используется технология VPN для подмены IP-адреса. Данный шаг позволяет имитировать запрос от

имени национального пользователя, что делает результаты выдачи достоверными [19].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ

Представлены результаты проведенного тестирования. Они сведены в основные таблицы, которые содержат:

- оценки русскоязычной выдачи поисковой системы Yandex;
- оценки англоязычной выдачи поисковой системы Google;
- оценки выдачи на китайском языке поисковой системы Baidu.

Эти таблицы позволяют рассчитать значения индекса ограничений контента в интернете (индекс цензуры) в США, Китае и России.

В каждой из таблиц по горизонтали расположены номера вопросов, приведенные в соответствии со списком из разд. 1. По вертикали находятся номера ответов из соответствующей поисковой выдачи. Напомним, что были проанализированы первые 10 ответов, которые приведены на первой странице выдачи. В ячейках таблиц записан балльный рейтинг полученного ответа согласно методике оценки, описанной в разд. 1. Сумма положительных и отрицательных баллов для каждого вопроса зафиксирована во второй снизу строке. В последней строке приведена итоговая оценка для поисковой системы в целом.

В качестве примера приведем табл. 1, которая содержит результаты оценки русскоязычной выдачи поисковой системы Yandex, когда вопросы задавались с российских IP-адресов.

Табл. 1. Результаты тестирования русскоязычной выдачи поисковой системы Yandex (в баллах).

Оценка	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
2	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0
3	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0
4	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1
5	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0
6	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	-1
7	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0
8	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0

9	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0
10	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	-1
Итого	10	7	0	6	9	9	7	1	4	9	-1
В целом	61/110										

В табл. 1 приведены оценки, как ответы поисковой выдачи соответствуют позиции правительства РФ. Запрос к Яндекс осуществлялся с российских IP-адресов, вопросы задавались на русском языке. В ходе тестирования ответы оценивались по трехбалльной системе (1, 0, -1).

В табл. 2 собраны данные о доступности альтернативной точки зрения. При оценке доступности использовалась двухбалльная система 1 и -1. Единица означает, что ответ содержит изложение альтернативной точки зрения. Оценка -1 ставится тогда, когда альтернативная позиция не представлена.

Из табл. 2 видно, что ответов, которые доносят альтернативную точку зрения пользователям поисковой системы, больше, чем ответов, где дается только правительственная точка зрения. Это превышение составляет 34 позиции из общего количества в 110 ответов. Следует отметить, что в значительной части ответов поддерживается позиция российского правительства, но при этом подробно излагается альтернативная точка зрения.

Табл. 2. Доступность альтернативной точки зрения в ответах (1, -1).

Оценка	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1
2	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1
3	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1
4	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1
5	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	1
6	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	1
7	1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1
8	-1	1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1
9	1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1
10	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	1
Итого	-6	10	10	2	-10	-10	8	8	4	10	8
В целом	34/110										

В табл. 3 и 4 приведены оценки для англоязычной выдачи поисковой системы Google.

Табл. 3 содержит данные о соответствии ответов поисковой выдачи позиции правительства США. Вопросы на английском языке задавались поисковой системе Google с американских IP адресов. Ответы оценены по трехбалльной системе (1, 0, -1).

В табл. 4 представлены оценки доступности альтернативной точки зрения в поисковой выдаче Google. Оценки выставлены по двухбалльной системе.

Табл. 3. Результаты оценки англоязычной выдачи поисковой системы Google (в баллах).

Оценка	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	-1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
3	1	0	1	1	-1	1	1	0	1	0	1
4	0	0	1	0	1	1		0	1	0	1
5	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1
6	1	0	1	1	1	1	-1	0	0	0	1
7	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1
8	1	-1	1	1	0	1	0	0	1	1	1
9	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1
10	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1
Итого	6	0	10	7	5	8	4	3	8	2	9
В целом	62/110										

Табл. 4. Доступность альтернативной точки зрения в ответах (1, -1).

Оценка	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1		-1	-1	1	1	1	1		1	-1
2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	1
3	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1
4	1	1	-1	1	-1	-1		1	-1	1	-1
5	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	1
6	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1

7	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1
8	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1
9	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1
10	-1		-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1
Итого	0	4	-10	-4	2	-6	-1	8	-7	6	-2
В целом	-10/110										

Пропуски в ячейках табл. 4 означают, что ответ не удалось оценить.

Следующие две табл. 5 и 6 содержат оценки для поисковой выдачи китайского Интернета. Вопросы на китайском языке задавались поисковой системе Baidu (Бейду) с китайских IP-адресов. В первую очередь оценивалось соответствие поисковой выдачи позиции властей КНР по трехбалльной системе (1, 0, -1), результаты сведены в табл. 5.

Табл. 5. Результаты оценки выдачи на китайском языке поисковой системы Baidu (в баллах).

Оценка	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
4	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
5	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
6	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0
7	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0
8	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0
9	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1
10	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0
Итого	6	7	9	5	10	10	10	9	5	9	1
В целом	81/110										

Табл. 6. Доступность альтернативной точки зрения в китайском сегменте глобальной сети.

Оценка	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1
2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1
3	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1
4	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
5	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
6	1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1
7	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1
8	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1
9	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1
10	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	1
Итого	0	2	-8	2	-10	-10	-2	4	2	-8	8
В целом	-20/110										

В табл. 6 представлены результаты оценки наличия в ответах альтернативной точки зрения. Один балл ставился, если в ответе упоминались основные пункты альтернативных утверждений.

При проведении тестирования наше внимание привлек тот факт, что результаты поисковой выдачи зависели от места, откуда производился запрос, и языка, на котором он задавался. Ответы на одни и те же вопросы значительно различались для запросов с российских, китайских или американских IP-адресов как для Яндекс, Baidu, так и Google.

В качестве иллюстрации включена дополнительная табл. 7. Она содержит оценки русскоязычной выдачи поисковой системы Google с российских IP-адресов

Табл. 7. Тестирование Google вопросами на русском языке с российских IP-адресов.

Оценка	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	-1	-1	0	0	0	-1	0	0	0	1	1
2	-1	-1	0	-1	-1	-1	0	0	-1	1	1
3	0	0	1	0	-1	-1	-1	0	1	1	1

4		0	1	-1		-1	-1	-1	-1	1	1
5	0	0	0	-1	-1	-1	1	0			1
6	0	1	0	0	-1	-1	1	-1	0	1	
7	-1	0	-1	-1	0	0	0	0	0	1	
8	1	-1		0	1	0	1	0	0	0	1
9	0	0	0	-1	0	0	-1	0	0	1	0
10	-1	-1	0	0	0	-1	0	-1	1	1	0
Итого	-4	-3	1	-5	-3	-7	0	-3	0	8	6
В целом	-11/110										

Приведенные оценки описывают соответствие ответов поисковой выдачи позиции правительства США. Оценка проводилась по трехбалльной системе (1, 0, -1), которую можно расшифровать как соответствует, нейтральна, не соответствует.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕСТИРОВАНИЯ

Прежде всего отметим, что для каждой поисковой системы оценивались 110 ответов на 11 вопросов.

В табл. 1 и 2 представлены данные тестирования российской поисковой системы Yandex. В первую очередь ответы сравнивались с позицией российского правительства, которая была зафиксирована заранее и оформлена в виде специального документа, который доступен по ссылке [10]. Оказалось, что 63 ответа из 110 можно считать проправительственными, и только два ответа противоречат позиции российских властей, причем оба касаются технологий ИИ.

По сравнению с нашим первым исследованием, проведенным в 2023 г., количество ответов с альтернативной точкой зрения уменьшилось многократно. Формулировки 10 вопросов 2023 г. можно найти в [20].

Тем не менее в тексте ответов, которые размечены как поддерживающие правительственную точку зрения, может содержаться достаточно полное изложение альтернативной позиции. Такое изложение позволяет понять позицию противоположной стороны, ее желания и устремления. Поэтому в табл. 2 собраны данные о доступности альтернативной точки зрения. При этом оценка ответов была двухбалльной, выбирался один из двух вариантов:

- из ответа можно понять положения альтернативной точки зрения;

- содержание ответа носит полностью проправительственный характер.

Оказалось, что большая часть ответов Yandex достаточно подробно описывает основные положения альтернативной точки зрения.

Для расчета значения индекса ограничений контента в Интернете (индекс цензуры) важно установить, какие ответы преобладают и можно ли восстановить основные положения альтернативной точки зрения, т. е. в качестве индекса свободы можно использовать разность между числом ответов, в которых подробно изложена альтернативная точка зрения, и числом проправительственных ответов. Эта величина указана в табл. 2, для России она составляет 34. Полученный результат показывает, что в российском сегменте Интернета граждане легко могут без особых усилий ознакомиться с альтернативной точкой зрения, а цензура не носит всеобъемлющего характера.

Анализ выдачи Google на английском языке показал, что большинство ответов в поисковой выдаче отражает позицию руководства США. Однако, четыре ответа из 110 можно оценить как альтернативные позиции властей США (табл. 3). Превышение числа проправительственных ответов над альтернативными составляет 62, что практически соответствует российскому уровню.

Различия с Россией появляются при анализе доступности в ответах с альтернативной точки зрения (см. табл. 4). Таких ответов значительно меньше, чем на российском поисковике. Число ответов, из которых можно понять альтернативную точку зрения, на 10 меньше, чем проправительственных ответов с единой точкой зрения.

Таким образом, пользователи Google на английском языке также имеют доступ к альтернативной точке зрения, но далеко не всегда. Очень часто СМИ, государство и интернет-компании в атлантических странах проявляют удивительное единомыслие, при этом альтернативная точка зрения замалчивается, хотя альтернативное мнение может принадлежать целым странам и континентам. Такое игнорирование часто приводит к международным конфликтам [21].

В то же время следует отметить более быструю реакцию атлантистов на изменения общественного мнения в соответствии с жизненными реалиями. Если какая-либо острая проблема не решается долгое время и требует постоянных затрат и внимания, то общественное настроение достаточно быстро изменяется. Оппозиционные мнения начинают появляться сначала в СМИ, потом

в поисковых выдачах, что приводит к принятию решений в реальной жизни. Достаточно низкие оценки уровня цензуры для поисковой системы Google на английском языке объясняются именно этим механизмом приспособления.

Если оценивать уровень влияния поисковых интернет-сервисов, то лидером по количеству пользователей в национальном сегменте станет китайская поисковая система Baidu. В наш авторский коллектив входит китайский аспирант, что значительно облегчило процесс доступа и сбора данных для последующего анализа. Получить полноценный доступ к китайскому сегменту глобальной сети и Baidu могут только китайские граждане. Кроме того, привлечение носителя языка к настоящей работе помогло нам в проведении полноценного анализа, результаты которого представлены в табл. 5 и 6.

Среди 110 ответов на вопросы не нашлось ни одного, который бы противоречил позиции китайского правительства. Зато 81 ответ оценен как проправительственный (табл. 5.). Это самый большой показатель среди трех стран, но различие с Россией и США составляет всего треть, т. е. уровень влияния правительства не так силен, как это иногда диагностируют.

Есть и достаточно значительное число ответов, из которых можно понять альтернативную точку зрения (табл. 6). Превышение ответов с правительственной точкой зрения над ответами, содержащими освещение альтернативной точки зрения, составляет 20 пунктов. Это значительно меньше, чем в России, но вполне сравнимо с США.

Табл. 1–6 содержат исходные данные, необходимые для расчета индекса ограничений контента в интернете (индекса интернет-цензуры). В этих таблицах численную оценку получили две тенденции:

- поддержка официальной точки зрения национальными поисковыми системами,
- возможность узнать альтернативную точку зрения при обращении к национальной поисковой системе.

Между значением индекса цензуры и уровнем поддержки официальной точки зрения должна наблюдаться положительная корреляция. Высокий уровень цензуры будет соответствовать высоким показателям поддержки собственных властей национальными поисковыми системами.

Возможность рядового пользователя без специальных навыков ознакомиться с альтернативной точкой зрения является самым наглядным и важным индикатором уровня интернет-цензуры в стране. Индекс интернет-цензуры находится в отрицательной корреляции с доступностью альтернативной точки зрения. Поэтому индекс интернет-цензуры предлагается рассчитать как разность между уровнем поддержки официальной точки зрения и доступностью альтернативной точки зрения. Сводные результаты для значений индексов интернет-цензуры в национальных сегментах интернета приведены в табл. 8.

Табл. 8. Итоговые значения индекса интернет-цензуры.

Страна	Россия	США	Китай
Соответствие ответов поисковой выдачи позиции правительства	61	62	81
Доступность альтернативной точки зрения	34	–10	–20
Итоговый показатель	27	72	101

Из табл. 8 видно о том, что в Китае власти оказывают наибольшее влияние на национальный сегмент глобальной сети. Следующей страной по уровню цензуры оказались США. Россия, против ожидания, имеет наименьшее значение этого индекса.

Объяснение этого факта довольно простое. Дело в том, что были проанализированы 10 ответов с первой страницы выдачи национальной поисковой системы. Выше уже отмечалось, что механизм цензуры в атлантических странах предусматривает ограничения на размещение нежелательной информации на популярных ресурсах – поисковые системы просто сдвигают вниз ответы с альтернативной точкой зрения.

Следует отметить, что подобный механизм цензуры оказался эффективнее, чем полное ограничение доступа к нежелательным материалам. Данные табл. 8 убедительно подтверждают это положение.

Именно такой подход объясняет удивительное единообразие мнений населения евроатлантических стран. Казалось бы, у атлантистов есть свобода выражения мнений, но она не предназначена для обычного гражданина или массового пользователя поисковых систем. В этих странах все основные источ-

ники информации жестко выдерживают заданную повестку. За противоположное мнение пока массово не наказывают, но предпосылки для преследования распространителей альтернативного мнения уже явно просматриваются.

В китайском национальном сегменте глобальной сети зарегистрированы самые сильные ограничения. Это не удивительно, так как доступ ограничен ко множеству ресурсов, пользователю необходима специальная процедура авторизации.

Следует также отметить, что наиболее сильные ограничения характерны для выдачи поисковых систем на родном (основном) языке, когда вопрос задается с IP-адресов из национального сегмента. При обращении к поисковым системам на дополнительных языках и со сторонних IP-адресов ответы выдачи носят более нейтральный характер. Это объясняется совпадающими устремлениями как национальных регуляторов, так и компаний-владельцев поискового бизнеса. Регуляторы заинтересованы в продвижении точки зрения собственного правительства, а для интернет-гигантов основным является получение прибыли. Поэтому стороны стремятся достичь компромисса и представлять информацию, устраивающую как можно большее число сторон.

Для подтверждения данного утверждения был проведен дополнительный тест, в котором блок вопросов предлагался поисковой системе Google с российских IP-адресов, т. е. вопросы задавались от имени российских пользователей и на русском языке, а выданные ответы сравнивались с позицией властей США. Анализ показал, что влияние на ответы американского правительства в этом случае можно считать минимальным (см. табл. 7).

Отметим, кардинальную разницу в содержании ответов Google для российских и американских пользователей (см. табл. 3 и 7). Если на английском языке только четыре ответа противоречили позиции американских властей, то на русском языке таких ответов 33. Кроме того, изменилось различие между провластными и альтернативными ответами: если в англоязычной версии первых было больше на 62 пункта, то в русскоязычной выдаче проамериканских ответов на 10 меньше. Таким образом, можно констатировать, что ответы поисковых систем не являются величиной постоянной и фиксированной, а зависят от многих факторов, прежде всего от языка запроса и страновой принадлежности

IP-адреса, с которого приходил запрос. Для запросов из США это проамериканская система, а для запросов из России – пророссийская.

Для сравнения приведем основной результат, полученный в ходе предыдущего нашего тестирования, выполненного несколько лет назад. Провластная позиция была выражена не так ярко: при запросах на родном языке из национального сегмента доля ответов с альтернативным мнением была в разы выше, причем эта тенденция наблюдалась как в российском, так и американском национальных сегментах.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ ЧАТ-БОТОВ

Проблема ограничений контента в Интернете (интернет-цензуры) не сводится только к ограничениям в выдаче поисковых систем. В настоящее время набирают популярность чат-боты, представляющие удобный интерфейс для общения с системами ИИ на базе БЯМ. Многие пользователи начинают использовать их в качестве альтернативного инструмента не только для поиска информации, но и для ее оценки. Поэтому без анализа ответов наиболее популярных чат-ботов оценка интернет-цензуры не может считаться полной [22].

Недавно была опубликована статья, в которой утверждается, что БЯМ являются носителями идеологии. Идеология чат-бота повторяет идеологические установки авторов БЯМ [23]. Эти два утверждения авторами из Бельгии вынесены в название статьи. Но они полностью повторяют выводы нашей статьи [20]. При этом ссылки на нашу работу нет, хотя и опубликована она в ведущем журнале ACM.

В качестве объектов для сравнения были выбраны чат-бот ChatGPT-4 от компании Microsoft, ее российский аналог Алиса от Яндекс, проприетарный Grok от компании xAI и китайская модель DeepSeek. Наша методика сравнительного анализа не претерпела существенных изменений по сравнению с оценкой поисковых систем. Набор вопросов остался прежним как на русском и китайском, так и на английском языках. 11 вопросов были заданы упомянутым выше чат-ботам. Ответы чат-ботов на эти вопросы фиксировались и оценивались по методике, описанной в разделе 2. Рейтинг ответов на вопросы из этого списка вопросов представлен в табл. 9 и 10.

В табл. 9 оценено соответствие ответов чат-ботов позиции правительств

стран, где разработан и зарегистрирован оператор БЯМ. Были изучены ответы двух моделей, созданных американскими компаниями (Microsoft и xAI), одной российской компании (Yandex) и китайской компании под торговой маркой DeepSeek. Вопросы чат-ботам задавались на родном языке его создателей, т. е. на английском языке для ChatGPT-4 и Grok, на русском для Алисы и на китайском для DeepSeek.

Табл. 9. Соответствие позиции правительства на национальном языке.

Номер вопроса	Оценка ответа			
	ChatGPT4 (англ.)	Алиса (рус.)	Grok (англ.)	DeepSeek (кит.)
1	1	0	1	1
2	0	0	1	1
3	1	0	1	1
4	1	1	1	1
5	1	1	1	1
6	1	1	1	1
7	1	0	1	1
8	0	1	0	1
9	1	–1	1	1
10	1	1	1	1
11	1	1	1	1
Итого	9	5	10	11

В первом столбце по вертикали табл. 9 указаны номера вопросов, приведенные в соответствии со списком из разд. 1. По горизонтали расположены оценки ответов исследуемых чат-ботов на родных языках. Суммарный балл для каждого чат бота зафиксирован в нижней строке таблицы. Ответы оценивались по трехбалльной шкале, оценка 1 ставилась, если содержание ответа совпадает с правительственной точкой зрения 0 фиксирует нейтральную позицию, а –1 ставилась за альтернативное мнение.

Отметим, что из 44 ответов чат-ботов только один противоречит позиции национальных властей, это ответ русскоязычного чат-бота Алиса на вопрос о характере и природе интернет-цензуры. Он показывает, что механизм цензуры,

применяемой атлантистами (США и их союзники), не изучен достаточно подробно. Кроме того, нет детального описания этого подхода и не опубликовано достаточного количества материалов, которые могли бы быть использованы при обучении БЯМ.

Данные табл. 9 позволяют судить об уровне цензуры в выдачах чат-ботов. Самое большое влияние на ответы национального чат-бота оказывают власти Китая. Ответы полностью совпадают с позицией властей, нет ни одного расхождения. Обе американские системы ИИ показали схожий результат, согласие с официальной позицией достигает 90%. Минимальный результат показала русскоязычная модель Алиса от Yandex.

Данные тестирования показали, что ответы англоязычных чат-ботов ChatGPT-4 и Grok носят намного более провластный характер (см. табл. 9), чем ответы поисковой системы Google (табл. 3). Возможно, это объясняется позицией доминирующих средств массовой информации, чьи материалы были включены в набор данных, используемых при обучении моделей. Еще одна причина состоит в том, что выдача поисковой системы содержит 10 ответов на первой странице. Чат-бот же должен свести свой ответ к единой позиции, что отражается на возможности предоставления альтернативной точки зрения.

Важным проявлением идеологического влияния является различие в содержании ответов моделей ИИ на один и тот же вопрос, заданный на различных языках. Как было отмечено ранее, ответы на национальном языке ближе к провластной позиции тестируемой модели ИИ [24]. Этот факт был установлен нами при исследовании вопроса интернет-цензуры и обсужден в разд. 2.

Табл. 10. Оценка ответов чат-ботов на дополнительных языках.

Номер вопроса	Оценка ответа		
	Алиса (англ.)	Grok (рус.)	DeepSeek (рус.)
1	0	1	1
2	0	0	1
3	–1	1	1
4	–1	1	1
5	1	0	1
6	1	0	1

7	0	0	1
8	0	1	1
9	-1	1	1
10	0	1	1
11	1	0	1
Итого	0	6	11

Подобный тест был повторен для чат-ботов, вопросы на русском языке задавались американской разработке Grok и китайской модели DeepSeek. Российскому чат-боту Алиса вопросы были предложены на английском языке. Результаты тестирования приведены в табл. 10.

Сравнение табл. 9 и 10 позволяет сделать вывод о том, что китайский чат-бот DeepSeek не изменяет свою позицию в зависимости от языка, на котором задается вопрос, причем позиция этого чат-бота всегда совпадает с официальной позицией китайских властей. Это достаточно удобно, так как о позиции Китая по тому или иному вопросу можно судить по ответам и комментариям DeepSeek.

Остальные модели демонстрируют приспособляемость к мнению властей чужой страны, различие между содержанием ответов на основном и дополнительных языках составляет порядка 40% от первоначальной оценки. Это различие для наглядности показано в табл. 11.

Табл. 11. Сравнение ответов на разных языках.

Язык запроса	Алиса	Grok	DeepSeek
Основной	5	10	11
Дополнительный	0	6	11
Отличие	5 (41.7%)	4 (33.3%)	0

Чат-бот Алиса демонстрирует наибольшую зависимость от языка, на котором задается вопрос. Подобная зависимость для чат-ботов повторяет картину, которая характерна для поисковых систем. В Китае официальное мнение преобладает в ответах любых интернет-систем, независимо от языка, на котором сформулирован запрос. Наибольшая доля ответов с альтернативным мнением встре-

чается у российского чат-бота Алиса. Его ответы изменяются наиболее значительно при смене языка запроса. Если вопросы задаются на английском (дополнительном) языке, то общая характеристика ответов получается нейтральной. Кроме единственного примера с ответами Алисы на английском языке, все остальные суммарные оценки отражают позицию национальных правительств.

Новое поколение БЯМ опирается в том числе и на совокупность данных, которая собирается в Интернете [25]. Хорошо известно, что в Интернете имеется большое количество недостоверной информации. Часть информации умышленно искажена, другая часть содержит частично неподтвержденную информацию. Следовательно, при обучении любой БЯМ необходим модуль первичной оценки данных, собранных в Интернете. Этот модуль должен оценивать уровень достоверности найденной информации и ее полноты [26]. Если игнорировать эту оценку, то ИИ может прийти к неточным и неполным выводам [27]. Поэтому необходимо разработать алгоритмы для создания подобного модуля и включить его в состав БЯМ. Это первоочередная задача для повышения доверия к выводам БЯМ. Однако сделать такой модуль абсолютно нейтральным не получится, он все равно будет подвержен влиянию человеческого фактора. Можно попытаться только максимально уменьшить влияние идеологической компоненты.

Следует также отметить, что технологии БЯМ могут применяться для осуществления цензуры в Интернете, в том числе для редактирования ответов поисковых систем [28].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен новый подход к определению индекса ограничений контента в Интернете (индекса интернет-цензуры) в разных странах. Согласно традиционному подходу интернет-цензуру оценивают по количеству блокировок источников информации. Однако, такой подход нельзя считать исчерпывающим, так как существует возможность ограничить доступ к материалу на этапе его размещения. Можно отказать в публикации материала на наиболее популярных площадках, в этом случае материал формально будет обнародован, но число его прочтений сильно ограничено. Поэтому в качестве критерия ограничений предложена оценка доступности альтернативной точки зрения.

Источником для отбора информации чаще всего выступают поисковые системы. Изучив их выдачу на разных языках, можно сделать вывод об уровне ограничений. В работе предложена оригинальная методика оценки. С помощью чат-ботов БЯМ сформулированы 11 вопросов в сферах, где наиболее сильны расхождения между позициями властей России, Китая и США. Содержание ответов предполагает альтернативные мнения и зависит от поисковой системы, модели ИИ и страны, для которой производится тестирование. В ответах могут содержаться проправительственная, нейтральная и альтернативная точки зрения.

В качестве национальных поисковых систем были выбраны Google, Яндекс и Baidu, как наиболее популярные в США, России и Китае. 11 вопросов для тестирования были сформулированы на русском, английском и китайском языках при помощи чат-ботов по специальной методике. Формулировка вопросов на разных языках была эквивалентной. Поисковая выдача была ограничена 10 ответами, всего пришлось анализировать 110 ответов.

Ответы оценивались в ходе сравнения с соответствующей правительственной точкой зрения. Для Google эталоном является точка зрения правительства США, для Яндекс ответы сравнивались с точкой зрения российской власти, точка зрения китайских властей служит образцом для оценивая ответов Baidu. Для оценки уровня ограничений использовались два показателя, первый равен проценту ответов, совпадающих с правительственной точкой зрения, а второй показывает доступность альтернативной точки зрения.

Чтобы избежать субъективности при установлении уровня соответствия правительственной точки зрения, использован кросс-энкодер. Эта специальная архитектура нейронных сетей определяет логические отношения между текстами и позволяет привести значение семантической близости к трем основным состояниям: совпадение содержания, нейтральность и противоположные смыслы.

Для определения уровня освещения альтернативной точки зрения в ответах поисковых систем использована методология LLM-as-a-Judge. Она предполагает формирование специального типа запроса (промпт) к чат-боту БЯМ. В тексте запроса приводится эталонное мнение в виде правительственной точки зрения и указание по выполнению оценки на наличие альтернативной точки зрения в выдаче поисковой системы. Применение технологий ИИ позволяет устранить

индивидуальную предвзятость исследователя и гарантировать единообразное применение правил оценки.

Уровень цензуры определялся разностью между числом ответов, совпадающих с правительственной точкой зрения, и количеством ответов, содержащих изложение альтернативных мнений. Наши исследования показали, что уровень совпадения с правительственной точкой зрения в России и США приблизительно одинаковый, в Китае он немного выше. Различие состоит в доле ответов с подробным описанием альтернативного мнения и итоговом значении индекса цензуры. Общая оценка выглядит достаточно неожиданной. Наименьшее значение индекса цензуры в Интернете получилось у России, промежуточное значение характеризует США и наибольшее значение рассчитано для Китая.

Полученные результаты показали, что уровень интернет-цензуры зависит от места регистрации IP-адреса, с которого производится запрос, и от языка запроса. Ответы любой поисковой системы коррелируют с позицией правительства той страны, откуда задан вопрос, причем наибольшая разность индексов цензуры наблюдается для Яндекса. Любой поисковик, кроме Baidu, для запросов из США представляет собой проамериканскую систему, а для запросов из России – пророссийскую. Китайская поисковая система всегда придерживается точки зрения китайских властей и меньше всего зависит от внешних обстоятельств.

Отдельно были изучены ответы от чат-ботов БЯМ, которые гораздо более идеологизированы, чем поисковые системы. Наше исследование показало, что чат-боты, даже будучи технологическими продуктами, не существуют в идеологическом вакууме. Они становятся «цифровыми послами» тех ценностных систем, в которых были созданы. Сравнительный анализ их ответов является мощным методом не только тестирования ИИ, но и диагностики идеологического ландшафта современного мира.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Warf B. Geographies of global Internet censorship // *GeoJournal*. 2011. Vol. 76. P. 1–23. <https://doi.org/10.1007/s10708-010-9393-3>
2. Lake E. American Nomenclatura: What the Twitter Files show // *Commentary*. 2023. Vol. 155, No. 2. P. 33–40.

3. *Filastò A.* Measuring Internet Censorship with OONI // RIPE 87, 27 November–1 December 2023, Rome, Italy.
4. *Raman R.S., Wiley B.G., Iyer K., Kwa T.H., Paris A.M.D., McCoy D.* Advancing the art of censorship data analysis // Free and Open Communications on the Internet (FOCI). 2023.
5. *Topornin N., Pyatkina D., Bokov Y.* Government regulation of the Internet as instrument of digital protectionism in case of developing countries // Journal of Information Science. 2023. Vol. 49, No. 3. P. 595–608.
<https://doi.org/10.1177/01655515211014142>
6. *Burnett S., Feamster N.* Making sense of internet censorship: a new frontier for internet measurement // ACM SIGCOMM Computer Communication Review. 2013. Vol. 43, No. 3. P. 84–89. <https://doi.org/10.1145/2500098.2500111>
7. *Gokul A.* LLMs and AI: Understanding Its Reach and Impact. 2023.
8. *Shi X., Wang C., Li Y., Sun L., Lin B.* Blind matching algorithm based proxy distribution against internet censorship // IET Communications. 2023. Vol. 17, No. 7. P. 863–877. <https://doi.org/10.1049/cmu2.12589>
9. *Prawira I., Ekaputri R.A.* Exploring Branding of Indonesian Journalists on Instagram // In: Mutsvairo B., Bebawi S., Borges-Rey E. (Eds.) The Routledge Companion to Journalism in the Global South. London: Routledge, 2023.
10. Исследовательский архив автора.
<https://disk.ssau.ru/s/xZkESxdt7CMAY2w>. (дата последнего обращения: 10 июня 2026 г.).
11. *Nalbant K.G., Aydin S.* Development and transformation in digital marketing and branding with artificial intelligence and digital technologies dynamics in the Metaverse universe // Journal of Metaverse. 2023. Vol. 3? No. 1. P. 9–18.
<https://doi.org/10.57019/jmv.1148015>
12. *Hickner A.* How do search systems impact systematic searching? A qualitative study // Journal of the Medical Library Association: JMLA. 2023. Vol. 111, No. 4. P. 774. <https://doi.org/10.5195/jmla.2023.1647>
13. *Логинова Н.А., Джериби М., Сухов А.М.* Ограничения на применение больших языковых моделей, налагаемые возрастом информации // Искусственный интеллект и принятие решений. 2025. № 2. С. 90–96.
<https://doi.org/10.14357/20718594250208>

14. *Lewandowski D.* Ranking Search Results // In: Lewandowski D. (Ed.) Understanding Search Engines. Cham: Springer International Publishing, 2023. P. 83–118.
15. *Yeremizina S.* Search engine optimization and its significance for the visibility and branding of businesses. An analysis of Google's search ranking algorithm and the effects of selected search engine optimization techniques. Doctoral dissertation. 2023.
16. *Lin G.* Using cross-encoders to measure the similarity of short texts in political science // American Journal of Political Science. 2025. T. 69, No. 4. P. 1600–1616. <https://doi.org/10.1111/ajps.12956>
17. *Li Y., Bandar Z.A., McLean D.* An approach for measuring semantic similarity between words using multiple information sources // IEEE Transactions on knowledge and data engineering. 2003. Vol. 15, No. 4. P. 871–882. <https://doi.org/10.1109/TKDE.2003.1209005>
18. *Li D. et al.* From generation to judgment: Opportunities and challenges of llm-as-a-judge // Proceedings of the 2025 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing. 2025. P. 2757–2791. <https://doi.org/10.18653/v1/2025.emnlp-main.138>
19. *Ramesh R., Vyas A., Ensafi R.* “All of them claim to be the best”: Multi-perspective study of VPN users and VPN providers // 32nd USENIX Security Symposium (USENIX Security 23). USENIX Association, 2023.
20. *Chayka A., Sukhov A.* Comparing chatbots trained in different languages // Communications of the ACM. 2023. Vol. 66, No. 12. P. 6–7. <https://doi.org/10.1145/3626835>
21. *Abushbak A.M., Majeed T., Sinha A.* Instagram, censorship and civilian activism: The digital presence of the Israel–Palestine conflict narratives // NIU International Journal of Human Rights. 2023. Vol. 10, No. 1. P. 162–171.
22. *Urman A., Makhortykh M.* The Silence of the LLMs: Cross-Lingual Analysis of Political Bias and False Information Prevalence in ChatGPT, Google Bard, and Bing Chat // arXiv preprint arXiv:2309.14544. 2023. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.14544>
23. *Buyl M., Rogiers A., Noels S. et al.* Large language models reflect the ideology of their creators // npj Artificial Intelligence. 2026. Vol. 2. P. 7. <https://doi.org/10.1038/s44387-025-00048-0>

24. Zarouali B., Poels T., Broeck K.V.D., Walrave M. Comparing Chatbots and Online Surveys for (Longitudinal) Data Collection: An Investigation of Response Characteristics, Data Quality, and User Evaluation // *Communication Methods and Measures*. 2023. P. 1–20. <https://doi.org/10.1080/19312458.2023.2252043>
25. Zmitrovich D., Sheplyakov A., Shavrina T., Smurov I., Fenogenova A., Mikhailov V., Chertok A. A family of pretrained transformer language models for Russian // *Proceedings of the 2024 Joint International Conference on Computational Linguistics, Language Resources and Evaluation (LREC-COLING 2024)*. 2024. P. 507–524. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.10931>
26. Williams A. Human-centric functional modeling and the metaverse // *Journal of Metaverse*. 2022. Vol. 2, No. 1. P. 23–28.
27. Крутенко Е.В., Штейнберг Б.Я. Ошибки искусственного интеллекта при решении комбинаторных задач // *Электронные библиотеки*. 2026. Т. 29, № 2. С. 428–441. <https://doi.org/10.26907/1562-5419-2026-29-2-428-441>
28. Дускин Е.И. Применение технологий искусственного интеллекта при осуществлении цензуры со стороны интернет-платформ // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Юридические науки*. 2024. Т. 28, № 3. С. 584–603. <https://doi.org/10.22363/2313-2337-2024-28-3-584-603>

ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES FOR THE ANALYSIS OF CONTENT RESTRICTIONS ON THE INTERNET

M. Djeribie¹ [0009-0000-5501-8257], H. Hu² [0009-0004-2902-2593], A. M. Sukhov³ [0000-0001-6948-4988]

¹⁻³*Samara National Research University, Samara, Russia*

¹djeribiemourad@inbox.ru, ²641229879@qq.com, ³sukhov@ssau.ru

Abstract

This paper proposes a new approach to determining the level of internet censorship. Our definition of censorship is based on the principle of accessibility of alternative viewpoints in search engine results and large language models. The calculation method involves compiling a list of 11 questions, the answers to which suggest opposite opinions depending on the country. These answers are evaluated in comparison with the government's point of view. For search engine results, calculate the number

of answers to these questions from a pro-government point of view and the proportion of answers that detail an alternative point of view. The difference between these indicators is proposed to be considered an index of internet censorship. Since Internet searches are increasingly performed through chatbots of the most well-known large language models (LLMs), the level of censorship is also assessed for these models. The comparison showed that the responses of the national search engine Baidu in China are closest to the government's point of view, while the level of censorship in the United States is higher than in Russia. The effectiveness of censorship in the United States is explained by a different mechanism, whereby materials expressing alternative opinions restrict access to popular information platforms. Censorship in chatbots is much stronger than in internet search engine results are calculated.

Keywords: *mechanisms of content restrictions on the Internet, methodology for measuring restrictions based on AI technologies, comparative analysis of the nature of restrictions in the USA, Russia, and China, content restrictions in chatbots.*

REFERENCES

1. Warf B. Geographies of global Internet censorship // *GeoJournal*. 2011. Vol. 76. P. 1–23. <https://doi.org/10.1007/s10708-010-9393-3>
2. Lake E. American Nomenclatura: What the Twitter Files show // *Commentary*. 2023. Vol. 155, No. 2. P. 33–40.
3. Filastò A. Measuring Internet Censorship with OONI // *RIPE 87*, 27 November–1 December 2023, Rome, Italy.
4. Raman R.S., Wiley B.G., Iyer K., Kwa T.H., Paris A.M.D., McCoy D. Advancing the art of censorship data analysis // *Free and Open Communications on the Internet (FOCI)*. 2023.
5. Topornin N., Pyatkina D., Bokov Y. Government regulation of the Internet as instrument of digital protectionism in case of developing countries // *Journal of Information Science*. 2023. Vol. 49, No. 3. P. 595–608. <https://doi.org/10.1177/01655515211014142>
6. Burnett S., Feamster N. Making sense of internet censorship: a new frontier for internet measurement // *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*. 2013. Vol. 43, No. 3. P. 84–89. <https://doi.org/10.1145/2500098.2500111>
7. Gokul A. LLMs and AI: Understanding Its Reach and Impact. 2023.

8. Shi X., Wang C., Li Y., Sun L., Lin B. Blind matching algorithm based proxy distribution against internet censorship // IET Communications. 2023. Vol. 17, No. 7. P. 863–877. <https://doi.org/10.1049/cmu2.12589>
9. Prawira I., Ekaputri R.A. Exploring Branding of Indonesian Journalists on Instagram // In: Mutsvairo B., Bebawi S., Borges-Rey E. (Eds.) The Routledge Companion to Journalism in the Global South. London: Routledge, 2023.
10. Issledovatel'skiy arkhiv avtora. <https://disk.ssau.ru/s/xZkESxdt7CMAY2w>. (date of last access: 10 June 2026).
11. Nalbant K.G., Aydın S. Development and transformation in digital marketing and branding with artificial intelligence and digital technologies dynamics in the Metaverse universe // Journal of Metaverse. 2023. Vol. 3? No. 1. P. 9–18. <https://doi.org/10.57019/jmv.1148015>
12. Hickner A. How do search systems impact systematic searching? A qualitative study // Journal of the Medical Library Association: JMLA. 2023. Vol. 111, No. 4. P. 774. <https://doi.org/10.5195/jmla.2023.1647>
13. Loginova N.A., Djeribie M., Sukhov A.M. Limitations on the use of Large Language Models imposed by information age // Artificial Intelligence and Decision Making. 2025. No. 2. P. 90–96. <https://doi.org/10.14357/20718594250208>
14. Lewandowski D. Ranking Search Results // In: Lewandowski D. (Ed.) Understanding Search Engines. Cham: Springer International Publishing, 2023. P. 83–118.
15. Yermizina S. Search engine optimization and its significance for the visibility and branding of businesses. An analysis of Google's search ranking algorithm and the effects of selected search engine optimization techniques. Doctoral dissertation. 2023.
16. Lin G. Using cross-encoders to measure the similarity of short texts in political science // American Journal of Political Science. 2025. T. 69, No. 4. P. 1600–1616. <https://doi.org/10.1111/ajps.12956>
17. Li Y., Bandar Z.A., McLean D. An approach for measuring semantic similarity between words using multiple information sources // IEEE Transactions on knowledge and data engineering. 2003. Vol. 15, No. 4. P. 871–882. <https://doi.org/10.1109/TKDE.2003.1209005>
18. Li D. et al. From generation to judgment: Opportunities and challenges of

llm-as-a-judge // Proceedings of the 2025 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing. 2025. P. 2757–2791.

<https://doi.org/10.18653/v1/2025.emnlp-main.138>

19. *Ramesh R., Vyas A., Ensafi R.* “All of them claim to be the best”: Multi-perspective study of VPN users and VPN providers // 32nd USENIX Security Symposium (USENIX Security 23). USENIX Association, 2023.

20. *Chayka A., Sukhov A.* Comparing chatbots trained in different languages // Communications of the ACM. 2023. Vol. 66, No. 12. P. 6–7.

<https://doi.org/10.1145/3626835>

21. *Abushbak A.M., Majeed T., Sinha A.* Instagram, censorship and civilian activism: The digital presence of the Israel–Palestine conflict narratives // NIU International Journal of Human Rights. 2023. Vol. 10, No. 1. P. 162–171.

22. *Urman A., Makhortykh M.* The Silence of the LLMs: Cross-Lingual Analysis of Political Bias and False Information Prevalence in ChatGPT, Google Bard, and Bing Chat // arXiv preprint arXiv:2309.14544. 2023.

<https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.14544>

23. *Buyl M., Rogiers A., Noels S. et al.* Large language models reflect the ideology of their creators // npj Artificial Intelligence. 2026. Vol. 2. P. 7.

<https://doi.org/10.1038/s44387-025-00048-0>

24. *Zarouali B., Poels T., Broeck K.V.D., Walrave M.* Comparing Chatbots and Online Surveys for (Longitudinal) Data Collection: An Investigation of Response Characteristics, Data Quality, and User Evaluation // Communication Methods and Measures. 2023. P. 1–20. <https://doi.org/10.1080/19312458.2023.2252043>

25. *Zmitrovich D., Sheplyakov A., Shavrina T., Smurov I., Fenogenova A., Mikhailov V., Chertok A.* A family of pretrained transformer language models for Russian // Proceedings of the 2024 Joint International Conference on Computational Linguistics, Language Resources and Evaluation (LREC-COLING 2024). 2024. P. 507–524.

<https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.10931>

26. *Williams A.* Human-centric functional modeling and the metaverse // Journal of Metaverse. 2022. Vol. 2, No. 1. P. 23–28.

27. *Krutenko E.V., Shteynberg B.Ya.* Oshibki iskusstvennogo intellekta pri reshenii kombinatornykh zadach // Elektronnye biblioteki. 2026. Vol. 29, No. 2. P. 428–441. <https://doi.org/10.26907/1562-5419-2026-29-2-428-441>

28. *Diskin E.I.* Primenenie tekhnologiy iskusstvennogo intellekta pri osushchestvlenii tsenzury so storony internet-platform // Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Yuridicheskie nauki. 2024. Vol. 28, No. 3. P. 584–603. <https://doi.org/10.22363/2313-2337-2024-28-3-584-603>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



ДЖЕРИБИ Мурад – С 2011 по 2016 год учился в Высшей учительской школе в Кубе, Алжир. После получения степени бакалавра работал учителем средней школы до 2022 года, затем продолжил обучение и в 2025 году получил степень магистра в Самарском университете. В настоящее время является аспирантом того же университета.

Mourad DJERIBIE – From 2011 to 2016, he studied at the Higher Normal School in Kouba, Algeria. After obtaining his bachelor's degree, he worked as a high school teacher until 2022, then continued his studies and graduated with a master's degree from Samara National Research University in 2025. He is now a postgraduate student at the same university.

email: djeribiemourad@inbox.ru

ORCID: 0009-0000-5501-8257



ХАО ХУ – В 2020 году получил степень магистра Национальной металлургической академии Украины по специальности «Металлургия». В настоящее время является аспирантом Самарского национального исследовательского университета (Россия). Область научных интересов — ограничения в применении искусственного интеллекта.

Hu HAO – In 2020, he received a master's degree in Metallurgy from the National Metallurgical Academy of Ukraine. Now he is a postgraduate student at Samara National Research University, Russia. His research area is constraints in the application of artificial intelligence.

email: 641229879@qq.com

ORCID: 0009-0004-2902-2593



СУХОВ Андрей Михайлович – профессор кафедры киберфотоники Самарского национального исследовательского университета имени академика С. П. Королева. Сфера научных интересов – компьютерные сети и сетевая безопасность, моделирование работы искусственного интеллекта.

Andrei Mikhailovich SUKHOV – professor at the Department of Cyberphotonics, Samara National Research University. Research interests include computer networks and network security, modeling of artificial intelligence operation.

email: sukhov@ssau.ru

ORCID: 0000-0001-6948-4988

Материал поступил в редакцию 18 июня 2026 года

МЕТОД ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ КОГНИТИВНОЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ АВИАЦИОННОГО ПЕРСОНАЛА ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

Д. С. Коптев¹ [0000-0002-7759-579X], Ю. А. Халин² [0000-0002-7020-8515]

^{1, 2}Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия

¹d.s.koptev@mail.ru, ²yur-khalin@yandex.ru

Аннотация

Разработан метод интегральной оценки когнитивной работоспособности летного и диспетчерского состава гражданской авиации, основанный на количественной формализации восьми ключевых когнитивных функций: внимания, оперативной памяти, темпа психических процессов, пространственных способностей, логического мышления, счетно-математических способностей, точности управляющих движений и эмоциональной устойчивости. Для определения весовых коэффициентов, отражающих относительный вклад каждой функции в интегральный показатель, применен метод анализа иерархий Т. Саати. Сформирована экспертная группа из семи специалистов трех профессиональных страт (действующие пилоты с налетом свыше 1000 ч, научные сотрудники в области авиационной психофизиологии, психологи врачебно-летной экспертной комиссии). Проверка согласованности индивидуальных экспертных оценок осуществлена через расчет отношения согласованности, все значения которого не превысили пороговый уровень 0.10. Согласованность мнений всей экспертной группы подтверждена коэффициентом конкордации Кендалла ($W = 0.682$) с высоким уровнем статистической значимости. На основе агрегации экспертных суждений методом среднегеометрического усреднения рассчитаны итоговые весовые коэффициенты, что позволило сформировать функциональную зависимость интегрального показателя когнитивной работоспособности. Полученные результаты демонстрируют доминирующую роль внимания и эмоциональной устойчивости в структуре профессиональной надежности авиационного персонала. Разработанный метод создает методологический базис для объективизации процедур

профессионального отбора, текущего мониторинга состояния когнитивной работоспособности экипажей и принятия решений о допуске к выполнению полетных заданий.

Ключевые слова: *безопасность полетов, когнитивная работоспособность, авиационный персонал, когнитивные функции, интегральная оценка, метод анализа иерархий, весовые коэффициенты, экспертная оценка, согласованность мнений.*

ВВЕДЕНИЕ

В современной авиационной отрасли обеспечение безопасности полетной эксплуатации сохраняет статус приоритетного направления развития, однако, аналитические отчеты международных регуляторов (ICAO, FAA, EASA) свидетельствуют о стабильной доминанте антропогенного фактора в структуре причин авиационных инцидентов, на долю которого приходится от 70% до 80% случаев [1]. Генезис большинства подобных ситуаций обусловлен девиациями когнитивной работоспособности пилотов: редукцией концентрации внимания, истощением ресурсов оперативной памяти, ингибированием скорости протекания ментальных операций, десинхронизацией механизмов эмоциональной саморегуляции – особенно в условиях кумулятивного стрессового воздействия, физического утомления или реализации нештатных алгоритмов полета [2].

Существующие методологии оценки профессиональной компетентности, базирующиеся на применении дискретных психодиагностических процедур, демонстрируют ограниченную валидность при попытке реконструкции многомерной, нестационарной архитектуры когнитивной активности летных экипажей. В контексте указанных ограничений инструментарий когнитивного моделирования приобретает выраженную научно-практическую актуальность: он позволяет формализовать детерминантные связи между компонентами когнитивного аппарата, параметрами операционной среды и паттернами поведенческого реагирования, формируя тем самым комплексные, динамически адаптируемые и семантически прозрачные цифровые дескрипторы когнитивной надежности специалистов авиационного профиля [3].

В трудах ведущих отечественных исследователей (Ю. А. Голиков, А. Н. Костин, А. В. Петровский, М. Г. Ярошевский, Л. Г. Дикая, В. И. Рождественская, В. Н. Соловьев, Н. В. Якимович и др.) когнитивная работоспособность концептуализируется как интегральная характеристика индивида, отражающая его способность к реализации целеполагающей деятельности заданного объема и степени ответственности, требующей мобилизации нервно-психических ресурсов и функционального вовлечения всего спектра когнитивных процессов в условиях регламентированных временных ограничений и нормативных критериев результативности (см. [4, 5]).

Динамика когнитивной работоспособности обусловлена влиянием полифакторной системы переменных, включающей врожденные психофизиологические характеристики, мотивационную направленность на выполнение задач, актуальное состояние здоровья, уровень накопленного утомления и стрессовой напряженности, а также резонанс между режимом трудовой деятельности и индивидуальными хронобиологическими циклами. При этом количественная верификация большей части указанных предикторов сопряжена со значительными временными и организационными издержками, тогда как практика превентивного управления рисками нуждается во внедрении мобильных, оперативных процедур экспресс-диагностики уровня когнитивной эффективности.

В указанном контексте особую научно-практическую значимость приобретает разработка высокоэффективных методологических подходов к контролю когнитивной работоспособности, обеспечивающих возможность комплексного, интегрального исследования всего спектра влияющих переменных в рамках единой диагностической процедуры.

АНАЛИЗ ИЗВЕСТНЫХ ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ КОГНИТИВНОЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ АВИАЦИОННОГО ПЕРСОНАЛА

Проблема метризации когнитивной работоспособности остается дискуссионной в психофизиологии. Если физическую нагрузку возможно стандартизировать через механические величины (Х. Ф. Ульмер, К. Брюк, К. Эве) [6], то объективация умственного труда, как отмечал еще Н. А. Бернштейн, сопряжена с существенными методологическими сложностями [7].

Существующие психометрические инструменты (индексы IQ, EQ) и тесты профессиональных достижений демонстрируют ограниченную валидность в прикладных задачах [8]. Их ключевым недостатком является дискретность: фиксируя статичный уровень изолированных функций, они игнорируют динамику деятельности и интегральные взаимосвязи, что критически снижает точность диагностики в состояниях утомления или стресса.

Более прогрессивным подходом является концепция интегральной оценки, реализуемая, в частности, в методике И. Г. Городецкого (индекс CQ) [9]. Эта модель рассчитывает работоспособность как линейную комбинацию качества сенсомоторной (Q_c) и логической (Q_l) видов деятельности с учетом коэффициента их корреляции (K):

$$CQ = n(\lambda_1 K + \lambda_2 Q_c + \lambda_3 Q_l).$$

Однако практическое применение индекса CQ ограничено жесткой зависимостью весовых коэффициентов (λ_i) от профессиональной специфики и возраста, что требует постоянной и трудоемкой рекалибровки модели под каждую новую выборку.

Расширением этой методики является использование программы «Адаптивная модель операторской деятельности (АМОД)» для оценки и контроля когнитивной работоспособности человека-оператора при осуществлении совмещенной деятельности [10, 11]. Однако, в дополнение к вышесказанному, существенным ограничением концепции является тестирование лишь двух компонентов когнитивной работоспособности, что является недостаточным.

Известна [12, 13] экспертно-аналитическая система «АСПО-2007», разработанная Научно-исследовательским испытательным центром авиационно-космической медицины и военной эргономики ЦНИИ ВВС МО РФ. Несмотря на развитый алгоритм интегральной оценки профессионально важных качеств, система ориентирована преимущественно для военной авиации. Некорректность прямой экстраполяции военных стандартов на персонал гражданской авиации из-за различий в структуре деятельности и критериях надежности делает невозможным использование этого комплекса без существенной адаптации.

В работе [14] реализован мультимодальный подход к объективации когнитивной нагрузки (Cognitive Workload, CW) операторов авиационной техники, базирующийся на синхронной регистрации нейрофизиологических и вегетативных маркеров в условиях имитации полетной деятельности. Экспериментальный протокол предполагал одновременный сбор трех потоков данных: электроэнцефалографической активности (ЭЭГ) для оценки корковой активации, вариабельности сердечного ритма (ЧСС) как индикатора вегетативного обеспечения деятельности и диаметра зрачка в качестве маркера активности центральной нервной системы. Интегральная метрика когнитивной нагрузки формировалась с помощью проприетарного алгоритма NCO (Neuro-Cognitive Operator), осуществляющего преобразование многомерного физиологического сигнала в нормированный скалярный показатель в диапазоне 0–100 ед. Критическим методологическим ограничением данного подхода выступает отсутствие в публикации детального описания архитектуры нейросетевой модели, процедуры ее обучения и валидации, что существенно снижает воспроизводимость результатов и затрудняет независимую верификацию конструктивной валидности получаемого индекса. Область валидности предложенной модели характеризуется выраженной узостью: эксперимент ограничивался анализом процедуры взлета в контролируемых симуляторных условиях, что не позволяет автоматически экстраполировать полученные закономерности на другие этапы полета.

Таким образом, существующие методы либо оценивают когнитивные функции фрагментарно, либо нормативно несовместимы с гражданской авиацией. Это определяет актуальность разработки нового метода интегральной оценки, обеспечивающего валидную и мобильную диагностику работоспособности с учетом специфики гражданских воздушных перевозок.

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью настоящего исследования была разработка метода интегральной оценки когнитивной работоспособности летного и диспетчерского составов гражданской авиации на основе репрезентативного набора когнитивных профессионально-важных качеств.

На начальном этапе необходимо было решить две методологически взаимосвязанные задачи: определить репрезентативный набор когнитивных функций авиационного персонала и обосновать возможность их формализации посредством математических моделей.

Профессиональная деятельность летного и диспетчерского составов гражданской авиации относится к классу эргатических систем повышенной сложности, где оператор выступает центральным звеном контура управления. Надежность функционирования такой системы детерминирована не столько техническими характеристиками воздушного судна или навигационного оборудования, сколько когнитивным потенциалом человека, способного воспринимать, перерабатывать и трансформировать информацию в управляющие воздействия в условиях дефицита времени, многозадачности и повышенных психоэмоциональных нагрузок.

Анализ структуры профессионально-важных качеств, представленный в трудах ведущих отечественных авиационных психологов (В. А. Пономаренко, В. А. Бодров, Б. Л. Покровский, А. Б. Леонова, А. А. Ворона и др.), позволяет выделить восемь когнитивных функций, составляющих необходимый и достаточный базис для интегральной оценки когнитивной работоспособности оператора: это внимание, оперативная память, темп психических процессов, пространственные способности, логическое мышление, счетно-математические способности, точность управляющих движений и эмоциональная устойчивость. Указанный перечень согласуется с требованиями приказа Минтранса России № 419 от 19.10.2022 г. [15] и находит подтверждение в современных исследованиях когнитивной надежности операторов эргатических систем [16], что обосновывает его использование в качестве методологического базиса для разработки интегрального показателя когнитивной работоспособности авиационного персонала.

Математическое моделирование когнитивных функций решает фундаментальную проблему психофизиологии — переход от качественных описаний к количественным метрикам. Без формализации когнитивные функции остаются абстрактными конструктами, непригодными для расчета интегрального показателя.

Построим для каждой когнитивной функции математическую модель, позволяющую количественно оценивать их вклад в итоговый интегральный показатель.

1. Внимание. Выступает фундаментальным процессом, обеспечивающим селекцию релевантных сигналов из потока сенсорной информации. В авиационном контексте устойчивость, распределение и переключаемость внимания критически важны для мониторинга приборной панели, поддержания радиосвязи и отслеживания изменений воздушной обстановки. Исследования демонстрируют, что редукция внимания является первичным звеном в цепи ошибок, приводящих к инцидентам. Количественно когнитивную функцию «внимание» можно оценить следующим образом:

$$X_v = \frac{T_f}{T_t} \cdot (1 - P_{err}),$$

где T_f – время удержания концентрации на целевом стимуле без отвлечений; T_t – общее время тестирования; P_{err} – вероятность ошибки обнаружения сигнала (отношение пропущенных сигналов к общему числу).

2. Оперативная память. Обеспечивает удержание и актуализацию полетной информации: параметров маршрута, инструкций диспетчера, процедур действий в нештатных ситуациях. Дефицит ресурсов оперативной памяти ведет к потере критических данных и нарушению последовательности операций. Математическая модель имеет следующий вид:

$$X_{op} = \frac{V_r}{V_p} \cdot K_{seq},$$

где V_r – объем верно воспроизведенной информации; V_p – максимальный объем предъявленной информации; K_{seq} – коэффициент сохранения последовательности (отношение верно воспроизведенных связей к общему числу).

3. Темп психических процессов. Определяет скорость восприятия, анализа и реакции на изменяющиеся условия. В динамической среде полета задержки в обработке информации могут иметь необратимые последствия, особенно на этапах взлета, посадки и разрешения конфликтных ситуаций в воздушном пространстве. Имеем

$$X_{\text{TPP}} = \frac{RT_r}{\overline{RT}} \cdot (1 - V_{\text{var}}),$$

где RT_r – референтное (нормативное) время реакции для данного типа задач; $\overline{RT}$ – среднее время сложной сенсомоторной реакции испытуемого; $V_{\text{var}} = \sigma_{\text{RT}} / \overline{RT}$ – коэффициент вариации времени реакции, отражающий стабильность темпа.

4. Пространственные способности. Позволяют оператору формировать и удерживать ментальную модель воздушной обстановки, оперировать трехмерными координатами, прогнозировать траектории движения. Для пилотов это непосредственно связано с пилотированием, для диспетчеров – с планированием эшелонов и предотвращением столкновений. Имеем

$$X_{\text{PS}} = \frac{N_{\text{cor}}}{N_t} \cdot \left(1 - \frac{\Theta_{\text{err}}}{\Theta_{\text{max}}} \right),$$

где N_{cor} – количество верно решенных задач на пространственную ориентацию; Θ_{err} – средняя угловая ошибка определения направления или положения объекта; Θ_{max} – максимально допустимая угловая погрешность.

5. Логическое мышление. Обеспечивает способность оператора анализировать причинно-следственные связи, выявлять закономерности, строить умозаключения и принимать решения в условиях неопределенности. В авиационной деятельности данная функция критически важна при возникновении нештатных ситуаций, когда пилот или диспетчер должны быстро оценить множество альтернативных сценариев и выбрать оптимальную стратегию действий. Имеем

$$X_{\text{LM}} = \frac{N_{\text{sol}}}{N_{\text{off}}} \cdot \left(\frac{T_{\text{norm}}}{T_{\text{fact}}} \right) \cdot K_{\text{diff}},$$

где N_{sol} – количество верно решенных логических задач; N_{off} – общее количество задач; T_{norm} – нормативное время на задачу; T_{fact} – фактическое время решения; K_{diff} – коэффициент сложности решенных задач (экспертная оценка уровня абстракции задач).

6. Счетно-математические способности. Эта функция обеспечивает точность вычислений, необходимых для навигации, расчета топливных остатков,

определения времени подлета, вертикальных скоростей и интервалов эшелонирования. Ошибки в вычислениях могут привести к нарушению безопасных интервалов между воздушными судами или критическому снижению запасов топлива. Имеем

$$X_{CMA} = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n (N_{fact}^i - N_{true}^i)}{\sum_{i=1}^n N_{true}^i} \right) \cdot K_{time},$$

где N_{fact}^i – числовое значение, полученное испытуемым при решении i -й задачи; N_{true}^i – эталонное значение при решении i -й задачи; n – общее количество задач;

$$K_{time} = \begin{cases} 1.0, & \text{если } T_{fact} \leq T_{limit} \\ 1.0 - 0.1 \cdot \frac{T_{fact} - T_{limit}}{T_{limit}}, & \text{если } T_{fact} > T_{limit} \end{cases}$$

– коэффициент учета времени; T_{fact} – фактическое время выполнения всех вычислений; T_{limit} – предельно допустимое время выполнения всех вычислений, установленное протоколом.

7. Точность управляющих движений. Отражает сенсомоторную координацию, необходимую для плавного и точного управления органами управления воздушного судна (штурвал, РУД, педали). Эта когнитивная функция особенно значима при ручном пилотировании в сложных метеорологических условиях, при заходе на посадку и в нештатных ситуациях. Имеем

$$X_{PCM} = \left(1 - \frac{1}{T} \int_0^T \frac{|\sigma(t)|}{\sigma_{lim}(t)} dt \right),$$

где $\sigma(t)$ – текущее отклонение от нормы при выполнении задачи; $\sigma_{lim}(t)$ – допустимое отклонение при выполнении задачи; T – время тестирования.

8. Эмоциональная устойчивость. Выполняет регуляторную функцию, обеспечивая сохранение когнитивной эффективности под воздействием стресса, утомления, монотонии или экстремальных факторов. Дестабилизация эмоциональной сферы вторично влияет на все остальные когнитивные функции, снижая общую когнитивную работоспособность оператора.

Имеем

$$X_{\text{EU}} = \frac{\sum_{i=1}^N \beta_i \cdot F_i(t)}{1 + \kappa \cdot \sum(t)},$$

где $\beta_i \geq 0$, $\sum \beta_i = 1$ – коэффициенты значимости (веса) когнитивных способностей; $F_i(t)$ – функциональное состояние i -й когнитивной способности в момент времени t ; $\kappa \geq 0$ – персональный коэффициент резистентности к стрессовым воздействиям; $\sum(t) \in [0, 1]$ – индекс психоэмоционального напряжения в момент времени t (определяется по комплексу объективных и субъективных индикаторов).

Все функции нормируются к единой шкале от 0 до 1 для обеспечения сопоставимости. Для исходных данных, характеризующихся как прямой, так и обратной шкалами интерпретации, алгоритм приведения к унифицированному диапазону реализован посредством линейного масштабирования согласно следующим математическим выражениям:

$$X^n = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}; \quad X^n = \frac{X_{\max} - X}{X_{\max} - X_{\min}}.$$

Проведенный анализ подтвердил, что весь спектр выбранных когнитивных детерминант поддается строгой математической формализации. Это фундаментальное свойство обеспечивает приведение разнородных психофизиологических параметров к единому метрическому пространству, где каждый показатель выражается через количественную шкалу сопоставимой размерности.

Таким образом, разработанные модели обеспечивают трансформацию качественных психофизиологических конструкторов в верифицируемые количественные метрики. Они создают техническую возможность для введения дифференцированных весовых коэффициентов, нормирования разнородных данных к унифицированной шкале и автоматизации расчетных операций. Совокупность указанных свойств формирует методологический и вычислительный базисы для синтеза интегрального показателя когнитивной работоспособности (ИПКР), пригодного для использования в системах поддержки принятия решений.

РАЗРАБОТКА ИНТЕГРАЛЬНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ОЦЕНКИ КОГНИТИВНОЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ АВИАЦИОННОГО ПЕРСОНАЛА

Функциональную зависимость ИПКР авиационного персонала в обобщенном виде можно представить как

$$\text{ИПКР} = p_1 \cdot X_V + p_2 \cdot X_{\text{OP}} + p_3 \cdot X_{\text{TPP}} + p_4 \cdot X_{\text{PS}} + p_5 \cdot X_{\text{LM}} + p_6 \cdot X_{\text{CMA}} + p_7 \cdot X_{\text{PCM}} + p_8 \cdot X_{\text{EU}},$$

где $p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7, p_8$ – весовые коэффициенты, учитывающие «вклад» каждой когнитивной функции в результирующее значение интегрального показателя.

Эта зависимость отражает аддитивную модель формирования ИПКР, где результирующая метрика конструируется как взвешенная линейная комбинация частных показателей, характеризующих отдельные когнитивные домены. Такая структурная организация обусловлена необходимостью агрегации разнородных психофизиологических параметров, измеряемых в различных метрических шкалах и имеющих несопоставимые физические размерности, в единый безразмерный индикатор, применимый для комплексной оценки функционального состояния оператора.

Введение весовых коэффициентов p_i продиктовано фундаментальным положением эргономики и инженерной психологии о неравнозначности отдельных когнитивных функций для обеспечения надежности профессиональной деятельности. Эмпирические исследования демонстрируют, что вклад различных когнитивных способностей в общую эффективность операторской деятельности существенно дифференцирован. Однако процедура определения значений весовых коэффициентов представляет собой нетривиальную методологическую проблему. Прямое интуитивное назначение весов подвержено влиянию субъективных факторов: когнитивных искажений экспертов, их профессиональной деформации, контекстуальных эффектов. Кроме того, при индивидуальном экспертном оценивании трудно обеспечить внутреннюю согласованность суждений: эксперт может утверждать, что функция X_1 важнее X_2 , X_2 важнее X_3 , но при этом X_3 важнее X_1 , что нарушает транзитивность предпочтений и дискредитирует полученные оценки.

Для преодоления указанных ограничений целесообразно использовать формализованный подход к определению весовых коэффициентов, основанный на методе анализа иерархий (Analytic Hierarchy Process – AHP), разработанном американским математиком Т. Саати [17]. Этот метод трансформирует качественную задачу определения относительной важности когнитивных функций в последовательность структурированных процедур парных сравнений, что существенно снижает когнитивную нагрузку на экспертов и повышает точность получаемых оценок.

Метод Саати базируется на декомпозиции сложной проблемы определения весов на иерархическую структуру, где на верхнем уровне расположена глобальная цель (определение структуры ИПКР), а на нижнем — альтернативы (восемь когнитивных функций). Эксперты последовательно сравнивают пары функций по шкале относительной важности, представленной в табл. 1, формируя матрицы парных сравнений.

Табл. 1. Оценки шкалы отношений.

Численное значение оценки	Интерпретация значения оценки
1	Когнитивные функции одинаково важны
3	Умеренное превосходство первой когнитивной функции над второй
5	Существенное или сильное превосходство первой когнитивной функции над второй
7	Значительное превосходство первой когнитивной функции над второй
9	Абсолютное превосходство первой когнитивной функции над второй
2, 4, 6, 8	Промежуточная оценка между двумя соседними суждениями
Обратная величина	Если при сравнении одного элемента получена одна из вышеуказанных оценок, то при сравнении второго элемента с первым оценкой относительной важности является обратная величина

Математическая обработка этих матриц позволяет рассчитать собственные векторы, компоненты которых и являются искомыми весовыми коэффициентами p_i .

Критическим преимуществом метода Саати является наличие встроенного механизма верификации экспертных суждений через расчет индекса согласованности (Consistency Index – CI)

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$$

и отношения согласованности (Consistency Ratio – CR)

$$CR = CI / CC ,$$

где $\lambda_{\max}$ – максимальное собственное значение матрицы парных сравнений; n – количество сравниваемых величин; CC – среднее значение индекса однородности случайным образом составленной матрицы парных сравнений, которое основано на экспериментальных данных [17].

Эти метрики позволяют количественно оценить степень логической непротиворечивости экспертных оценок и отклонять результаты тех экспертов, у которых CR превышает пороговое значение 0.1, что обеспечивает высокую достоверность итоговых весовых коэффициентов.

Чтобы агрегировать мнения группы экспертов, рассчитывают среднегеометрическое по следующей формуле:

$$g_i = \sqrt[k]{\prod_{j=1}^k a_{i,j}} ,$$

где k – количество экспертов в группе; $a_{i,j}$ – численное значение относительной важности когнитивной функции X_i по отношению к X_j .

Компоненты нормализованного вектора приоритетов рассчитывают по формуле

$$p_i^H = g_i / \sum_{i=1}^k g_i .$$

Оценка согласованности мнений группы экспертов проводится с целью обеспечения требуемой обоснованности принимаемых решений на основе данных, полученных от группы экспертов.

ФОРМИРОВАНИЕ ЭКСПЕРТНОЙ ГРУППЫ

Процедура комплектования экспертного пула для верификации весовых коэффициентов когнитивных детерминант, интегрированных в показатель работоспособности, базировалась на аксиоматике метода анализа иерархий (МАИ). Саати. В основополагающих работах создателя методики [17] указано, что реализация группового экспертного оценивания в парадигме МАИ требует обеспе-

чения компромисса между статистической значимостью суждений и организационной доступностью процедуры. При отсутствии универсальных стандартов, регламентирующих кворум участников, эмпирические данные [18, 19] подтверждают: оптимальный состав группы в количестве 5–9 экспертов позволяет достичь максимального соответствия между валидностью агрегированных оценок и ресурсоемкостью исследования.

Таким образом, было принято решение о формировании экспертной группы из 7 специалистов, распределенных по трем функциональным стратам (табл. 2).

Табл. 2. Состав экспертной группы.

Страта	Количество экспертов	Квалификационные требования
Специалисты по профессиональному психологическому отбору	2	Действующие психологи ВЛЭК гражданской авиации
Эксперты – научные сотрудники	2	Признанные специалисты в области авиационной психофизиологии, авиационной медицины и исследования влияния человеческого фактора на безопасность полетов
Летный состав	3	Пилоты гражданской авиации, имеющие налет более 1000 ч

Первая страта представлена психологами врачебно-летной экспертной комиссии (2 человека) с опытом обследования свыше 500 кандидатов. Их компетенции обеспечивают нормативно-методическую и прогностическую валидность, так как суждения опираются на статистически верифицированные корреляции между тестовыми показателями и успешностью летного обучения либо обеспечения безопасности полетов.

Вторую страту составили научные сотрудники (2 человека), обладающие признанным авторитетом в сферах авиационной психофизиологии, медицины и исследований влияния человеческого фактора на безопасность полетов в гражданской авиации. Наличие публикационной активности в рецензируемых изданиях и практического стажа послужили гарантом конструктивной валидности: оцениваемые функции соотносены с актуальными теоретическими концепциями профессиональной деятельности.

Третью страту сформировали действующие пилоты гражданской авиации (3 человека). Ключевым критерием их отбора стали суммарный налет, превышающий 1000 ч, включая практику управления воздушным судном в осложненных метеорологических условиях и нештатных ситуациях, а также наличие действующих лицензий CPL или ATPL. Обоснованием такого квалификационного критерия послужила необходимость получения оценок, базирующихся на устойчивых ментальных моделях полетной деятельности. Анализ данных систем отчетности о безопасности (в частности, NASA ASRS) свидетельствует, что именно на этом этапе профессионального становления у пилотов кристаллизуется имплицитное понимание компенсаторных механизмов когнитивной системы. Это гарантирует содержательную валидность экспертных суждений при ранжировании когнитивных детерминант. Превышение численности данной страты над остальными (3 против 2) продиктовано принципами человеко-центрированного проектирования: поскольку пилоты являются непосредственными субъектами эксплуатации разрабатываемого оценочного инструмента, их приоритетное мнение необходимо для обеспечения соответствия методики реальным операционным условиям (экологическая валидность).

ЭКСПЕРТНАЯ ОЦЕНКА КОГНИТИВНЫХ ФУНКЦИЙ АВИАЦИОННОГО ПЕРСОНАЛА

Для минимизации влияния групповой динамики и эффекта конформизма процедура осуществлялась в анонимном режиме. На этапе сбора первичных данных каждый эксперт группы независимо заполнил матрицы парных сравнений (табл. 3).

Табл. 3. Пример матрицы парных сравнений для оценки когнитивных функций авиационного персонала.

Сравниваемые функции	Вн.	ОП	ТПП	ПС	ЛМ	СМС	ТУД	ЭУ
Вн.	1	$a_{1,2}$	$a_{1,3}$	$a_{1,4}$	$a_{1,5}$	$a_{1,6}$	$a_{1,7}$	$a_{1,8}$
ОП	$1/a_{1,2}$	1	$a_{2,3}$	$a_{2,4}$	$a_{2,5}$	$a_{2,6}$	$a_{2,7}$	$a_{2,8}$
ТПП	$1/a_{1,3}$	$1/a_{2,3}$	1	$a_{3,4}$	$a_{3,5}$	$a_{3,6}$	$a_{3,7}$	$a_{3,8}$
ПС	$1/a_{1,4}$	$1/a_{2,4}$	$1/a_{3,4}$	1	$a_{4,5}$	$a_{4,6}$	$a_{4,7}$	$a_{4,8}$
ЛМ	$1/a_{1,5}$	$1/a_{2,5}$	$1/a_{3,5}$	$1/a_{4,5}$	1	$a_{5,6}$	$a_{5,7}$	$a_{5,8}$
СМС	$1/a_{1,6}$	$1/a_{2,6}$	$1/a_{3,6}$	$1/a_{4,6}$	$1/a_{5,6}$	1	$a_{6,7}$	$a_{6,8}$

ТУД	$1/a_{1,7}$	$1/a_{2,7}$	$1/a_{3,7}$	$1/a_{4,7}$	$1/a_{5,7}$	$1/a_{6,7}$	1	$a_{7,8}$
ЭУ	$1/a_{1,8}$	$1/a_{2,8}$	$1/a_{3,8}$	$1/a_{4,8}$	$1/a_{5,8}$	$1/a_{6,8}$	$1/a_{7,8}$	1

Примечание: В табл. 3 использованы следующие обозначения: Вн. – внимание; ОП – оперативная память; ТПП – темп психических процессов; ПС – пространственные способности; ЛМ – логическое мышление; СМС – счетно-математические способности; ТУД – точность управляющих движений; ЭУ – эмоциональная устойчивость.

Следующим шагом стала математическая обработка полученных массивов. В соответствии с алгоритмом метода анализа иерархий была выполнена проверка индивидуальных матриц на внутреннюю непротиворечивость. Количественные метрики согласованности суждений каждого эксперта систематизированы и представлены в табл. 4.

Табл. 4. Результат проверки индивидуальных матриц группы экспертов на согласованность.

Сравниваемые когнитивные функции	Специалисты по профессиональному психологическому отбору		Научные эксперты		Летный состав		
	Экс. № 1	Экс. № 2	Экс. № 3	Экс. № 4	Экс. № 5	Экс. № 6	Экс. № 7
	Частные нормированные значения весовых коэффициентов когнитивных функций						
Вн.	0.153	0.232	0.138	0.265	0.27	0.235	0.221
ОП	0.138	0.132	0.043	0.065	0.179	0.146	0.12
ТПП	0.046	0.132	0.216	0.174	0.169	0.097	0.12
ПС	0.073	0.086	0.124	0.044	0.11	0.097	0.112
ЛМ	0.036	0.076	0.081	0.200	0.103	0.08	0.048
СМС	0.017	0.026	0.024	0.038	0.046	0.027	0.023
ТУД	0.259	0.051	0.059	0.038	0.058	0.084	0.041
ЭУ	0.278	0.265	0.315	0.176	0.065	0.234	0.315
$\lambda_{\max}$	8.627	8.753	8.190	8.373	8.616	8.760	8.691
CI	0.09	0.108	0.027	0.053	0.088	0.108	0.098
CR	0.064	0.076	0.019	0.038	0.062	0.076	0.07

Таким образом, все представленные индивидуальные матрицы парных сравнений успешно прошли процедуру верификации на внутреннюю непротиворечивость. Рассчитанные значения CR для каждого эксперта не превысили критический порог в 0.10, что свидетельствует о допустимом уровне логической когерентности суждений. Данный результат является императивным условием

для интеграции соответствующих матриц в процесс агрегации группового мнения, обеспечивая тем самым методологическую чистоту и статистическую достоверность последующих расчетов весовых коэффициентов.

ПРОВЕРКА СОГЛАСОВАННОСТИ МНЕНИЙ ЭКСПЕРТНОЙ ГРУППЫ

Для проверки согласованности мнений экспертной группы был использован дисперсионный коэффициент конкордации Кендалла

$$W = \frac{12S}{d^2 \cdot (n^3 - n) - d \sum_{s=1}^d T_s},$$

где d – количество экспертов в группе; n – количество сравниваемых (ранжируемых) факторов; $S = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{k=1}^d r_{ik} - \bar{r} \right)^2$ – вариация относительно среднего ранга; r_{ik} –

ранг, присвоенный k -м экспертом i -му фактору; $\bar{r} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_{ik}$ – средний ранг

(оценка математического ожидания); $T_s = \sum_{k=1}^{H_s} (p_k^3 - p_k)$ – поправка на наличие связанных рангов в s -й ранжировке; H_s – число групп равных рангов в s -й ранжировке; p_k – число равных рангов в k -й группе связанных рангов при ранжировке s -м экспертом [20].

Данный коэффициент измеряет степень согласованности ранжировок, присвоенных одним и тем же факторам несколькими экспертами, и принимает значения в диапазоне от 0 (полное рассогласование) до 1 (полная согласованность).

На основе данных табл. 4 и в соответствии с методикой оценки коэффициента конкордации Кендалла была выполнена проверка согласованности мнений экспертов каждой страты отдельно, а затем всей группы экспертов (табл. 5).

Табл. 5. Матрица рангов экспертных мнений

Сравниваемые когнитивные функции	Специалисты по профессиональному психологическому отбору		Научные эксперты		Летный состав		
	Экс. № 1	Экс. № 2	Экс. № 3	Экс. № 4	Экс. № 5	Экс. № 6	Экс. № 7
	Присвоенные ранги						
Вн.	3	2	3	1	1	1	2
ОП	4	3.5	7	5	2	3	3.5
ТПП	6	3.5	2	4	3	4,5	3.5
ПС	5	5	4	6	4	4,5	5
ЛМ	7	6	5	2	5	7	6
СМС	8	8	8	7.5	8	8	8
ТУД	2	7	6	7.5	7	6	7
ЭУ	1	1	1	3	6	2	1
W (по стратам)	0.799		0.811		0.839		
W (по всей группе экспертов)	0.682						

Оценим статистическую значимость полученных значений W . Коэффициент конкордации представляет собой случайную величину. В соответствии с [21], для $n > 7$ оценка значимости W производится по критерию Пирсона χ_p^2 с $\nu = n - 1$ степенями свободы по следующей формуле:

$$\chi_p^2 = \frac{S}{\frac{1}{12}d \cdot n \cdot (n+1) - \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n T_s}.$$

С помощью этой формулы получены следующие результаты.

1. Для страт экспертов из числа специалистов по профессиональному психологическому отбору представителей научного сообщества ($d = 2$) расчетное значение критерия Пирсона составило $\chi_p^2 = 12.136$ и $\chi_p^2 = 12.160$ соответственно. Табличное значение критерия для $\nu = 7$ и уровня значимости $\alpha = 0.10$ равно $\chi_m^2 = 12.02$. Поскольку $\chi_p^2 > \chi_m^2$, гипотеза о согласованности мнений экспертов принимается.

2. Для страты экспертов из числа летного состава ($d = 3$) расчетное значение критерия Пирсона составило $\chi_p^2 = 17.612$. Табличное значение критерия для $\nu = 7$ и уровня значимости $\alpha = 0.02$ равно $\chi_m^2 = 16.62$. Поскольку $\chi_p^2 > \chi_m^2$, гипотеза о согласованности мнений экспертов принимается.

3. Для общей группы экспертов ($d = 7$) на основе полученного коэффициента конкордации Кендалла $W = 0.682$ можно утверждать о достаточно хорошей согласованности экспертных мнений при высоком уровне значимости $\alpha = 0.001$ ($\chi_p^2 = 33.441$).

АГРЕГАЦИЯ МНЕНИЙ ЭКСПЕРТНОЙ ГРУППЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕСОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ИПКР

Интеграция индивидуальных оценок семи экспертов в единое коллективное мнение была осуществлена посредством процедуры агрегации персональных матриц парных сравнений. Для обеспечения математической корректности объединения разнородных данных использован аппарат среднегеометрического усреднения, применяемый к соответствующим элементам матриц каждого участника. Результатом данной операции стало формирование обобщенной матрицы парных иерархий, которая аккумулирует согласованные предпочтения экспертной группы и выступает исходным массивом для расчета итоговых весовых коэффициентов когнитивных детерминант (табл. 6). Полученная матрица является согласованной ($\lambda_{\max} = 8.252$; $CI = 0.036$; $CR = 0.026$). Итоговые веса оказались равны: $p_1 = 0.246$; $p_2 = 0.112$; $p_3 = 0.134$; $p_4 = 0.091$; $p_5 = 0.079$; $p_6 = 0.023$; $p_7 = 0.067$; $p_8 = 0.248$.

Табл. 6. Агрегированная матрица парных иерархий группы экспертов.

Сравниваемые функции	Вн.	ОП	ТПП	ПС	ЛМ	СМС	ТУД	ЭУ
Вн.	1	2.712	2.284	2.918	3.139	5.473	3.293	0.512
ОП	0.369	1	0.914	1.27	1.346	4.123	1.768	0.496
ТПП	0.438	1.094	1	1.472	1.795	4.877	1.668	0.72
ПС	0.343	0.787	0.679	1	1.534	3.611	1.17	0.413
ЛМ	0.319	0.743	0.557	0.652	1	3.927	1.626	0.348
СМС	0.183	0.243	0.205	0.277	0.255	1	0.328	0.192
ТУД	0.304	0.566	0.599	0.855	0.615	3.046	1	0.357

ЭУ	1.952	2.015	1.39	2.42	2.877	5.221	2.8	1
----	-------	-------	------	------	-------	-------	-----	---

Таким образом, функциональная зависимость ИПКР авиационного персонала имеет вид

$$\begin{aligned} \text{ИПКР} = & 0.246 \cdot X_V + 0.112 \cdot X_{OP} + 0.134 \cdot X_{TPP} + 0.091 \cdot X_{PS} + \\ & + 0.079 \cdot X_{LM} + 0.023 \cdot X_{CMA} + 0.067 \cdot X_{PCM} + 0.248 \cdot X_{EU}. \end{aligned}$$

Расчет численного ИПКР представляет собой лишь промежуточный этап диагностической процедуры. Для практического применения метода в системах профессионального отбора и текущего мониторинга необходимо преобразовать абстрактную метрику диапазона [0; 1] в категоризованную оценку о пригодности специалиста. С этой целью была введена трехуровневая шкала интерпретации, позволяющая классифицировать текущее состояние когнитивной работоспособности оператора относительно нормативных требований гражданской авиации.

ОБОСНОВАНИЕ ТРЕХУРОВНЕВОЙ ШКАЛЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

Выбор границ шкалы обусловлен необходимостью баланса между чувствительностью диагностического инструмента и устойчивостью к случайным флуктуациям психофизиологического состояния. В настоящей работе предложено разделение множества возможных значений ИПКР на три диапазона, соответствующие низкому, среднему и высокому уровням когнитивной работоспособности. Граничные значения установлены на основе принципа квартильного деления нормированного распределения [22].

1. Зона низких значений (ИПКР $\in$ [0; 0.25]). Значения в этом диапазоне свидетельствуют о выраженном дефиците когнитивных ресурсов, недостаточном для безопасного выполнения профессиональных обязанностей. В контексте задач профессионального отбора кандидаты с показателями в этой зоне классифицируются как «нерекомендованные». При текущем мониторинге действующего персонала попадание в данную зону является основанием для временного отстранения от полетных заданий и направления на углубленное психофизиологическое обследование.

2. Зона средних значений (ИПКР $\in$ (0.25; 0.75]). Этот диапазон отражает вариативность нормы для широкой популяции. Для авиационного персонала интерпретация этой зоны требует дифференцированного подхода: значения, близкие к нижней границе (0.26 – 0.40), могут указывать на наличие скрытых рисков и требуют усиленного мониторинга, тогда как значения верхней половины интервала (0.50 – 0.75) соответствуют устойчивому функциональному состоянию. В условиях профессионального отбора эта зона может трактоваться как «условно пригодные» при условии отсутствияотягающих факторов.

3. Зона высоких значений (ИПКР $\in$ (0.75; 1.0]). Показатели в этой зоне характеризуют операторов с оптимальным уровнем развития когнитивных функций, обладающих запасом надежности для деятельности в осложненных условиях.

Методологическим обоснованием выбранной градации служит традиционный способ деления процентильной кривой на части путем отведения на крайние области по 25% каждой (деление по квартилям). Подобный подход широко применяется в практике профессионального психологического отбора и позволяет стандартизировать процедуру принятия решений на основе интегральных показателей [2]. Использование именно квартильных границ (0.25 и 0.75) для нормированных данных обеспечивает статистическую прозрачность критериев и упрощает процедуру верификации методики.

ОГРАНИЧЕНИЯ МЕТОДА И НЕОБХОДИМОСТЬ ЭМПИРИЧЕСКОЙ ВАЛИДАЦИИ

Следует особо подчеркнуть, что предложенная шкала интерпретации на текущем этапе исследования носит характер методологического прототипа. Установленные границы (0.25 и 0.75) базируются на математической логике нормирования и экспертном заключении, однако не подкреплены достаточным объемом эмпирических данных по целевой выборке авиационного персонала. Прямое использование данных пороговых значений в практике обязательного профессионального отбора без дополнительной верификации может привести к необоснованному допуску лиц со сниженной когнитивной работоспособностью или, наоборот, к необоснованному отсеву перспективных кандидатов.

Для перевода методики из статуса исследовательской в статус нормативно утвержденной необходимо проведение процедуры критериальной валидации на репрезентативной выборке. Минимально необходимый объем выборки для построения устойчивых нормативных распределений должен составлять не менее 100 представителей для каждой категории специалистов (пилоты самолетов, вертолетчики, диспетчеры управления воздушным движением). Это требование обусловлено необходимостью обеспечения статистической мощности критериев согласованности и возможности выявления значимых различий между профессиональными группами.

Такой подход позволит обеспечить научную обоснованность принимаемых решений и соответствует современным требованиям обеспечения безопасности полетов в гражданской авиации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан метод интегральной оценки когнитивной работоспособности авиационного персонала, принципиальным отличием которого от существующих подходов является комплексный охват восьми когнитивных функций (внимание, оперативная память, темп психических процессов, пространственные способности, логическое мышление, счетно-математические способности, точность управляющих движений, эмоциональная устойчивость) с дифференцированными весовыми коэффициентами, что обеспечивает более полную реконструкцию многомерной архитектуры когнитивной работоспособности оператора.

Для каждой когнитивной функции построены математические модели, обеспечивающие переход от качественных психофизиологических конструкторов к верифицируемым количественным метрикам, нормированным к единой шкале $[0, 1]$. Алгоритмическая реализация этих моделей создает техническую возможность для автоматизации расчетных процедур и получения диагностических данных в режиме реального времени.

Применение метода анализа иерархий Т. Саати для определения весовых коэффициентов позволило минимизировать субъективность экспертных оценок за счет процедуры парных сравнений и встроенного механизма верификации

логической согласованности. Все семь индивидуальных матриц парных сравнений продемонстрировали приемлемый уровень внутренней непротиворечивости ($CR < 0.10$), что подтверждает методологическую чистоту исходных данных.

Стратифицированный подход к формированию экспертной группы (2 психолога ВЛЭК, 2 научных эксперта, 3 пилота) обеспечил репрезентативность мнений. Расчет коэффициента конкордации Кендалла ($W = 0.682$) и его статистическая проверка по критерию Пирсона ($\chi^2_p = 33.441 > \chi^2_{\tau} = 24.32$ при $\alpha = 0.001$) подтвердили высокую согласованность мнений всей экспертной группы, что позволяет рассматривать полученные весовые коэффициенты как статистически обоснованные.

На основе агрегации экспертных суждений методом среднегеометрического усреднения рассчитаны итоговые весовые коэффициенты, которые выявили иерархическую структуру когнитивной работоспособности авиационного персонала: доминирующее влияние оказывают внимание ($p_1 = 0.246$) и эмоциональная устойчивость ($p_8 = 0.248$), что согласуется с данными о роли человеческого фактора в структуре авиационных инцидентов; вспомогательное влияние оказывают счетно-математические способности ($p_6 = 0.023$) и точность управляющих движений ($p_7 = 0.067$).

На основе принципа квартильного деления нормированного распределения предложено разделение множества возможных значений ИПКР на три диапазона, соответствующие низкому (ИПКР $\in [0; 0.25]$), среднему (ИПКР $\in (0.25; 0.75]$) и высокому (ИПКР $\in (0.75; 1.0]$) уровням когнитивной работоспособности.

Разработанный метод интегральной оценки когнитивной работоспособности создает методологическую основу для решения практических задач гражданской авиации: совершенствования процедур профессионального отбора кандидатов в летные училища, организации текущего мониторинга когнитивного состояния действующих экипажей, принятия обоснованных решений о допуске к выполнению полетных заданий после периодов болезни или стрессовых событий, а также для оценки эффективности реабилитационных мероприятий.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются эмпирическая валидация метода на расширенной выборке (не менее 100 испытуемых) с установлением пороговых критериев допуска; разработка программного модуля для автоматизации расчета ИПКР; адаптация весовых коэффициентов под специфические категории авиационного персонала (командиры воздушных судов, вторые пилоты, диспетчеры разных зон ответственности); интеграция метода с системами объективного контроля для непрерывного мониторинга когнитивной работоспособности в реальных условиях полета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Panish, Boyle, Ravipudi and Shea. Aviation and Plane Crash Statistics.*
URL: https://www.psbr.law/aviation_accident_statistics.html
2. *Алексеев М.С., Серова А.А. Системно-психологическая концепция профессионального отбора лиц летного и диспетчерского состава // Системная психология и социология. 2024. № 4 (52). С. 18–31.*
<https://doi.org/10.24412/2223-6872-2024-452-18-31>
3. *Yu H., Xue H., Li J., Fan W. Effects of cognitive load on human cognitive reliability // 11th International Conference on Information Systems and Computing Technology (ISCTech). 2023. P. 201–206.*
<https://doi.org/10.1109/ISCTech60480.2023.00047>.
4. *Дикая Л.Г. Психическая саморегуляция функционального состояния человека (системно-деятельностный подход). М.: Институт психологии РАН, 2003. 240 с. ISBN 5-9270-0048-7.*
5. *Голиков Ю.Я., Костин А.Н. Психология автоматизации управления техникой. М.: Институт психологии РАН, 1996. 160 с.*
6. *Ульмер Х.Ф., Брюк К., Эве К. и др. Физиология человека. В 3-х томах. М.: Мир, 1996. 198 с.*
7. *Бернштейн Н.А. О ловкости и ее развитии. М.: «Физкультура и спорт» Государственного комитета СССР по печати, 1991. 288 с.*
8. *Анастаси А. Психологическое тестирование: монография. М.: Директ-Медиа, 2008. 859 с. ISBN: 978-5-9989-0357-1.*

9. Городецкий И.Г. Трофимов Е.А. Индекс когнитивной работоспособности операторов в эргатических системах // Психологический журнал. 2016. Т. 37. № 5. С. 22–31.
10. Городецкий И.Г. Якимович Н.В., Трофимов Е.А., Чиронов В.В., Петрова Е.М. Создание методики для диагностики способности к совмещенной деятельности // Психологические исследования. 2012. Т. 5, № 26. 12 с.
<https://doi.org/10.54359/ps.v5i26.734>
11. Демина П.Н., Трофимов Е.А., Берсенева Е.Ю. Методология оценки и контроля когнитивной работоспособности человека-оператора при осуществлении совмещенной деятельности в условиях воздействия неблагоприятных факторов среды // Пилотируемые полеты в космос. 2024. № 2 (51). С. 35–46.
12. Жданько И.М., Ворона А.А., Запечникова И.В., Булавин В.В. Профессионально важные качества как средство повышения профессиональной деятельности летного состава // Военная мысль. 2017. № 9. С. 87–93.
13. Военная авиационная психология: Сборник лекций / Под редакцией В.А. Пономаренко. М.: «Перо», 2021. 600 с. ISBN 978-5-00189-780-4.
14. Antoine M., Abdessalem H., Frasson C. Cognitive Workload Assessment of Aircraft Pilots // Journal of Behavioral and Brain Science. 2022. Vol. 12 (10). P. 474–484. <https://doi.org/10.4236/jbbs.2022.1210027>
15. Приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 19 октября 2022 г. № 419 «Об утверждении Порядка проведения профессионального отбора пилотов гражданской авиации и диспетчеров управления воздушным движением» // Официальный интернет-портал правовой информации. 2022. № 0001202210250003.
<http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202210250003>.
16. Алексеенко М.С. Психологический профиль пилотов, эксплуатирующих разные типы воздушных судов // Системная психология и социология. 2022. № 4 (44). С. 19–27. <https://doi.org/10.25688/2223-6872.2022.44.4.02>
17. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. 320 с.

18. Forman E., Peniwati K. Aggregating individual judgments and priorities with the analytic hierarchy process // European Journal of Operational Research. 1998. Vol. 108(1). P. 165-169. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00244-0](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00244-0)
19. Ishizaka A., Labib A. Review of the main developments in the analytic hierarchy process // Expert Systems with Applications. 2011. Vol. 38 (11). P. 14336–14345. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.04.143>
20. Лубенец Ю.В. Альтернативный коэффициент конкордации при наличии связанных рангов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2021. Т. 17, № 1. С. 40–45. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2021.17.1.005>
21. Филатов В.И., Борукаева А.О., Бердилов П.Г. Алгоритм анализа согласованности экспертных оценок параметров аппаратно-программного комплекса автоматизированного рабочего места // Труды МАИ. 2018. № 103. С. 20.
22. Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебник для вузов. 2-е изд. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2004. 573 с. ISBN 5-238-00573-3.

METHOD OF INTEGRAL ASSESSMENT OF COGNITIVE PERFORMANCE OF CIVIL AVIATION PERSONNEL

D. S. Koptev¹[0000-0002-7759-579X], Y. A. Khalin²[0000-0002-7020-8515]

^{1,2} Southwest State University, Kursk region, Kursk, 305040, Russia

¹d.s.koptev@mail.ru, ²yur-khalin@yandex.ru

Abstract

A method for integrating the cognitive performance of civil aviation flight and air traffic control personnel has been developed. It is based on the quantitative formalization of eight key cognitive functions: attention, working memory, mental processing speed, spatial abilities, logical thinking, numeracy, control accuracy, and emotional stability. Saaty's analytic hierarchy process was used to determine weighting factors reflecting the relative contribution of each function to the integrated indicator. An expert group of seven specialists from three professional strata was formed

(active pilots with over 1000 flight hours, researchers specializing in aviation psychophysiology, and psychologists from the medical flight expert commission). The consistency of individual expert assessments was verified by calculating the consistency ratio (CR), all values of which did not exceed the threshold of 0.10. The consistency of the opinions of the entire expert group was confirmed by the Kendall concordance coefficient ($W=0.682$) with a high level of statistical significance. Based on the aggregation of expert judgments using the geometric mean averaging method, final weighting coefficients were calculated, which made it possible to form a functional dependence of the integrated indicator of cognitive performance. The obtained results demonstrate the dominant role of attention ($p_1=0.246$) and emotional stability ($p_8=0.248$) in the structure of professional reliability of aviation personnel. The developed method creates a methodological basis for the objectification of professional selection procedures, ongoing monitoring of the state of cognitive performance of crews, and decision-making on clearance to perform flight tasks.

Keywords: *flight safety, cognitive performance, aviation personnel, cognitive functions, integrated assessment, analytic hierarchy process, weighting factors, expert assessment, consensus of opinions.*

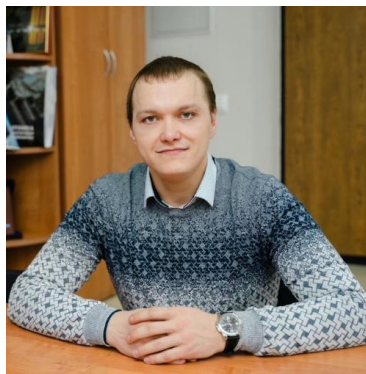
REFERENCES

1. Panish, Boyle, Ravipudi and Shea. Aviation and Plane Crash Statistics. URL: https://www.psbr.law/aviation_accident_statistics.html
2. Alekseenko M.S., Serova A.A. System-psychological concept of professional selection of flight and air traffic control personnel // Systems Psychology and Sociology. 2024. No. 4 (52). P. 18–31. <https://doi.org/10.24412/2223-6872-2024-452-18-31>
3. Yu H., Xue H., Li J., Fan W. Effects of cognitive load on human cognitive reliability // 11th International Conference on Information Systems and Computing Technology (ISCTech). 2023. P. 201–206. <https://doi.org/10.1109/ISCTech60480.2023.00047>
4. Dikaya L.G. Mental self-regulation of the functional state of a person (system-activity approach). M.: Institute of Psychology of the Russian Academy of Sciences, 2003. 240 p. ISBN 5-9270-0048-7.

5. Golikov Yu.Ya., Kostin A.N. Psychology of automation of equipment control. M.: Institute of Psychology of the Russian Academy of Sciences, 1996. 160 p.
6. Ulmer H.F., Bruck K., Ewe K., et al. Human physiology. In 3 volumes. M.: Mir, 1996. 198 p.
7. Bernstein N.A. On dexterity and its development. M.: Physical Culture and Sport, USSR State Press, 1991. 288 p.
8. Anastazi A. Psychological Testing: A Monograph. M.: Direct-Media, 2008. 859 p. ISBN: 978-5-9989-0357-1.
9. Gorodetsky I.G., Trofimov E.A. Cognitive Performance Index of Operators in Ergatic Systems // Psychological Journal. 2016. Vol. 37, No. 5. P. 22–31.
10. Gorodetsky I.G., Yakimovich N.V., Trofimov E.A., Chironov V.V., Petrova E.M. Development of a Methodology for Diagnostics of Ability to Perform Combined Activities // Psychological Research. 2012. Vol. 5, No. 26. 12 p.
<https://doi.org/10.54359/ps.v5i26.734>
11. Demina P.N., Trofimov E.A., Bersenev E.Yu. Methodology for Assessing and Monitoring the Cognitive Performance of a Human Operator During Combined Activities Under the Influence of Unfavorable Environmental Factors // Manned Space Flights. 2024. No. 2(51). P. 35–46.
12. Zhdanko I.M., Vorona A.A., Zapechnikova I.V., Bulavin V.V. Professionally Important Qualities as a Means of Improving the Professional Performance of Flight Crew // Military Thought. 2017. No. 9. P. 87–93.
13. Military Aviation Psychology: A Collection of Lectures / Edited by V.A. Ponomarenko. M.: Pero, 2021. 600 p. ISBN 978-5-00189-780-4.
14. Antoine M., Abdessalem H., Frasson C. Cognitive Workload Assessment of Aircraft Pilots // Journal of Behavioral and Brain Science. 2022. Vol. 12(10). P. 474–484. <https://doi.org/10.4236/jbbs.2022.1210027>
15. Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation of October 19, 2022 No. 419 "On Approval of the Procedure for the Professional Selection of Civil Aviation Pilots and Air Traffic Controllers" // Official Internet Portal of Legal Information. 2022. No. 0001202210250003.
<http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202210250003>

16. *Alekseenko M.S.* Psychological profile of pilots operating different types of aircraft // *Systems Psychology and Sociology*. 2022. No. 4 (44). P. 19–27.
<https://doi.org/10.25688/2223-6872.2022.44.4.02>
17. *Saati T.* Decision Making. The Analytic Hierarchy Process. M.: Radio and Communications, 1993. 320 p.
18. *Forman E., Peniwati K.* Aggregating individual judgments and priorities with the analytic hierarchy process // *European Journal of Operational Research*. 1998. Vol. 108(1). Pp. 165–169. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00244-0](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00244-0)
19. *Ishizaka A., Labib A.* Review of the main developments in the analytic hierarchy process // *Expert Systems with Applications*. 2011. Vol. 38 (11). P. 14336–14345. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.04.143>
20. *Lubenets Yu.V.* Alternative concordance coefficient in the presence of related ranks // *Bulletin of the Voronezh State Technical University*. 2021. Vol. 17, No. 1. P. 40–45. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2021.17.1.005>
21. *Filatov V.I., Borukaeva A.O., Berdikov P.G.* An Algorithm for Analyzing the Consistency of Expert Estimates of the Parameters of the Hardware and Software Complex of an Automated Workstation // *Proceedings of MAI*. 2018. No. 103. P. 20.
22. *Kremer N. Sh.* Probability Theory and Mathematical Statistics: Textbook for Universities. 2nd ed. M.: UNITY-DANA, 2004. 573 p. ISBN 5-238-00573-3.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



КОПТЕВ Дмитрий Сергеевич – старший преподаватель кафедры информационной безопасности, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет».

Dmitry Sergeevich KOPTEV – senior lecturer at the department of Information Security Southwest State University.

email: d.s.koptev@mail.ru

ORCID 0000-0002-7759-579X



ХАЛИН Юрий Алексеевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Программная инженерия», ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет».

Yuri Alekseevich KHALIN – Candidat of technical science, Associate Professor, associate professor at the Department of Software Engineering, Southwest State University.

email: yur-khalin@yandex.ru

ORCID 0000-0002-7020-8515

Материал поступил в редакцию 15 апреля 2026 года

ПРИМЕНЕНИЕ ГРАФОВЫХ МОДЕЛЕЙ УЧЕБНЫХ ПЛАНОВ ДЛЯ АНАЛИЗА ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ ПО СПЕЦИАЛЬНОСТЯМ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

Д. А. Ли¹ [0009-0001-0961-8021], **И. Г. Ольгина**² [0000-0002-9932-4552]

¹*Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия*

²*Омский филиал Российской академии народного хозяйства и государственной службы (РАНХиГС) при Президенте Российской Федерации, ООО «Неопоиск», г. Омск, Россия*

¹li@satorydigital.ru, ²inna_olgina@mail.ru

Аннотация

Проектирование учебных планов в условиях динамики образовательных стандартов смещается от статичного набора дисциплин к системному моделированию. Этот подход должен учитывать многоуровневые взаимосвязи и логику формирования сквозных компетенций. Целью исследования являются создание и апробация методического инструментария для анализа образовательных программ вузов на основе методов сетевого анализа. Учебный план формализован в виде неориентированного графа, где вершинами выступают дисциплины, а ребрами – связи через общие компетенции. В работе применен многоаспектный сетевой анализ, включающий расчет мер центральности: степени связности, посредничества, близости к другим узлам, степени влиятельности – и ключевых топологических метрик: плотности, модулярности, диаметра и коэффициента кластеризации. Эмпирическую базу составили данные учебных планов трех вузов города Омска. Проведенный анализ выявил существенные структурно-топологические различия в архитектуре образовательных программ, обусловленные их ведомственной принадлежностью и целевыми моделями подготовки. Сетевые метрики позволяют количественно оценить междисциплинарную связность и модульность программ, что недоступно для традиционных подходов. Полученные результаты подтверждают высокий диагностический потенциал сетевого анализа для обоснованной оптимизации

учебных планов и верификации соответствия профессиональным компетенциям.

Ключевые слова: *сетевой анализ, учебные дисциплины, граф, социальные сети.*

ВВЕДЕНИЕ

Ключевое предназначение образования заключается в том, чтобы побудить и обеспечить фундаментальные, содержательные и долговременные изменения в системе знаний обучающихся. В этой связи учебный план перестает восприниматься как статичный перечень дисциплин, а становится архитектурным решением, определяющим логику формирования образовательных траекторий, распределение учебных нагрузок и интеграцию теоретических, практических и исследовательских компонентов обучения.

При этом конструирование учебных планов все чаще рассматривается как задача системного моделирования, требующая учета многоуровневых связей между дисциплинами, профессиональными стандартами, требованиями работодателей и индивидуальными образовательными потребностями обучающихся. В научной литературе активно обсуждаются методологические основания обновления образовательных программ, однако сохраняется дефицит эмпирически обоснованных подходов к их динамической оптимизации, верификации соответствия актуальным компетенциям и оценке эффективности на основе образовательных данных [1–6].

ГРАФОВЫЕ МОДЕЛИ УЧЕБНОГО ПЛАНА

В работах [7–10] проведены исследования образовательных программ с точки зрения достижения заявленных образовательных результатов в виде набора компетенций, но не предложены методы анализа учебных программ на основе графовых моделей. Исследование [8] получило грантовую поддержку по проекту «Образование 2030», оно будет взято за основу дальнейших исследований в этой области. Авторы пришли к выводу, что графовая модель и подход к визуализации способствуют пониманию структуры учебного плана и поэтапности формирования образовательных результатов. Такая модель позво-

ляет осуществлять сравнительный анализ различных образовательных программ для повышения качества их проектирования.

Далее будут рассмотрены два способа представления графа сети учебного плана: в виде матрицы смежности и списка дуг. На их основе будут созданы инструменты для построения модели сети учебного плана. Первый способ является подходящим для вычисления мер центральности, а второй – для сбора сети. Хранение графа цитирования в виде списка дуг является удобным по ряду причин: компактность, удобство изменения структуры и возможность быстрого определения множества дуг, исходящих из одной вершины [11].

Граф учебного плана (УП) построен на основе сети учебных дисциплин как математической модели, которая наглядно отражает логическую структуру образовательного процесса, последовательность изучения дисциплин и их взаимосвязи.

Математическими моделями сетей учебных дисциплин являются неориентированные графы (рис. 1). Узлами сети являются учебные дисциплины, а связями – коммуникации между дисциплинами, которые формируют одинаковые компетенции у студентов. Опишем способы представления графов

Способ 1 – Представление графа сети в виде списка дуг. Граф сети учебного плана представлен в виде неориентированного графа $G = (V, E)$, где V – множество вершин графа, а E – множество его ребер. В графе G множество V состоит из вершин, которые соответствуют дисциплинам учебного плана, и содержит n занумерованных вершин. Граф будет представлен в виде списка ребер – неупорядоченных пар вершин $(v_i, v_j) \in E$, где v_i и v_j соединены ребром. В этом случае если $e_{ij} = (v_i, v_j)$ – ребро неориентированного графа, то v_i и v_j называют концевыми (или инцидентными) вершинами ребра e_{ij} .

Таким образом, вершина v_i соответствует дисциплине, формирующей как минимум одну общую компетенцию с вершиной v_j . Для дисциплин, находящихся в таком отношении, должно выполняться следующее условие: не существует дисциплины, которая ссылается на саму себя. Следовательно, должно выполняться неравенство $v_i \neq v_j$ (нет петель).

Способ 2 – Представление графа сети в виде матрицы смежности. Сеть учебных планов будет представлена в виде неориентированного графа

$G = (V, E)$ с матрицей смежности $A = \|a_{ij}\|$, составленной по следующему правилу: если дисциплина i формирует вместе с дисциплиной j как минимум одну общую компетенцию, то $a_{ij} = 1$, и $a_{ij} = 0$ в противном случае.

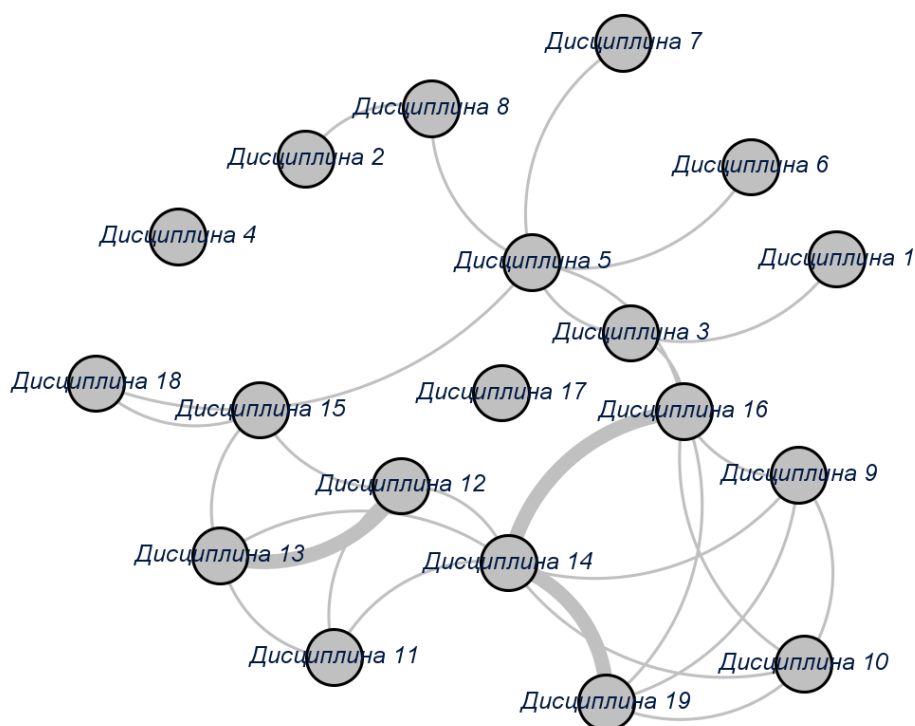


Рис. 1. Граф учебного плана.

ПРОВЕДЕНИЕ АНАЛИЗА УЧЕБНЫХ ПЛАНОВ

Этап 1. Сбор данных об учебных планах, создание графовых моделей.

Сбор данных является основной задачей для определения структурной информации о сети. На этом этапе данные собирались и обрабатывались вручную из открытых источников Интернета. В будущем планируется создать соответствующий модуль, в который будет заложен универсальный алгоритм сбора данных для построения сети учебных дисциплин.

На рис. 2–4 представлены графы сетей учебных дисциплин трех вузов города Омска: Омского государственного технического университета (ОмГТУ), Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) и Омского государственного университета им. Ф. М. Достоевского (ОмГУ). Данные были взяты из открытых источников Интернета. Рассмотрены

учебные планы по специальности «Информатика и вычислительная техника» за доступные года: ОмГТУ – за 2024 г., СибАди – за 2025 г., ОмГУ – за 2022 г.

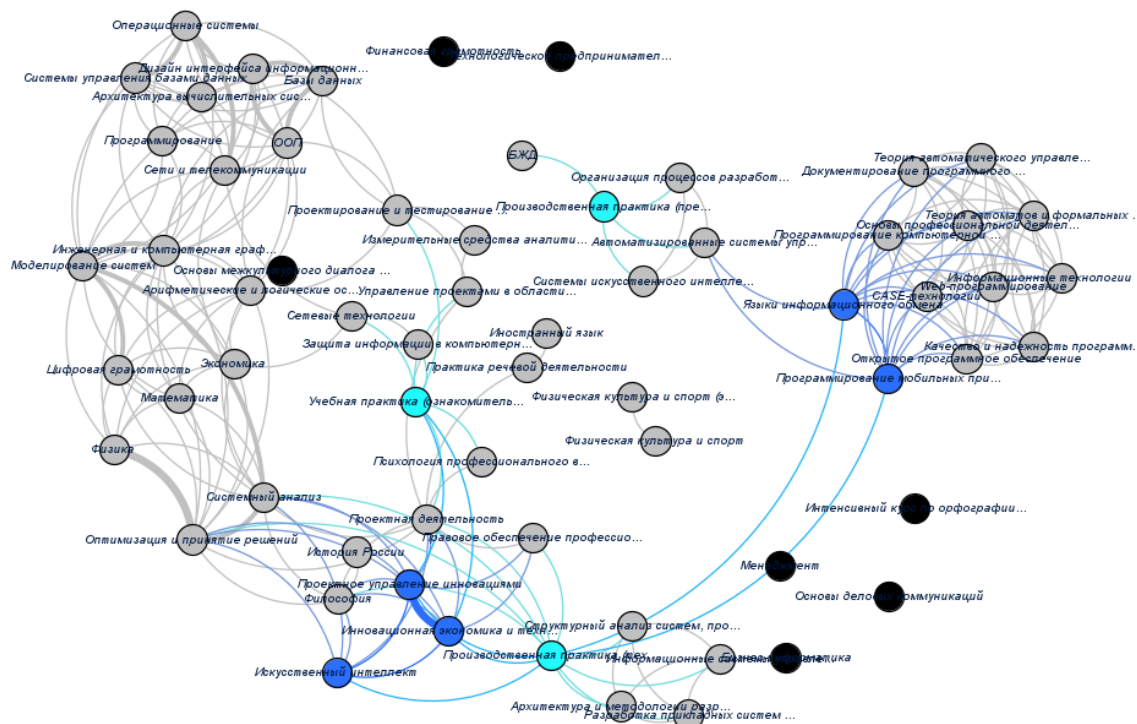


Рис. 2. Модель сети учебного плана ОмГТУ.

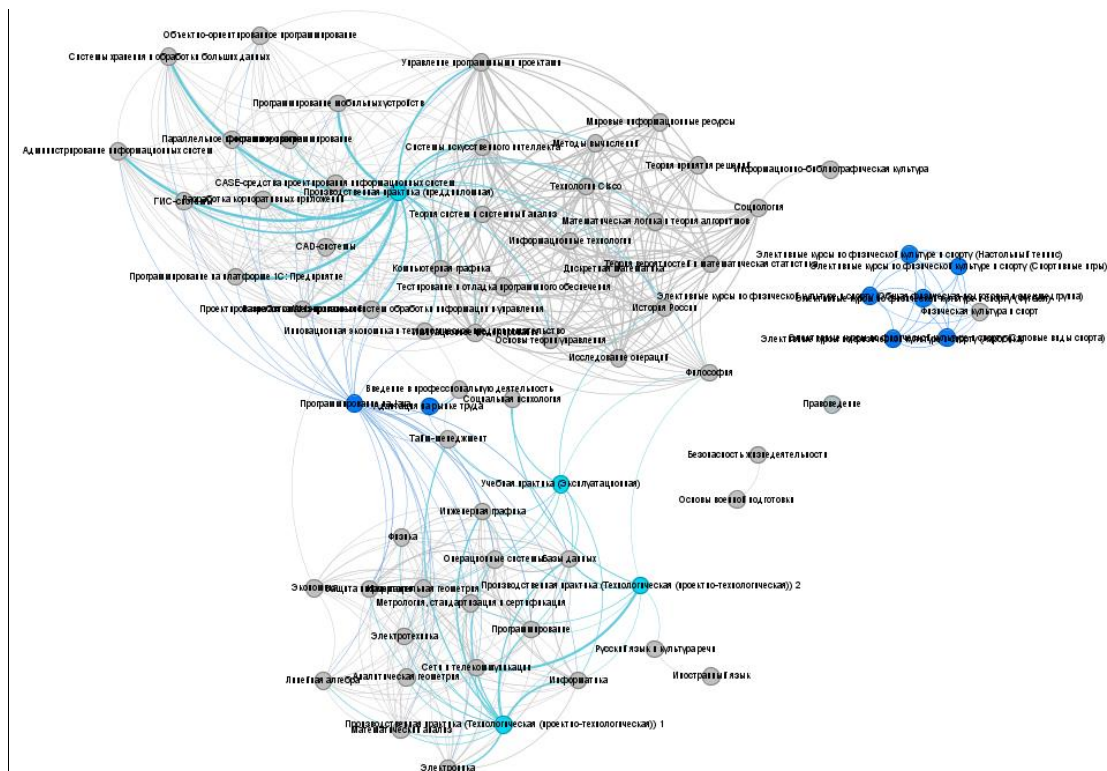


Рис. 3. Модель сети учебного плана СибАди.

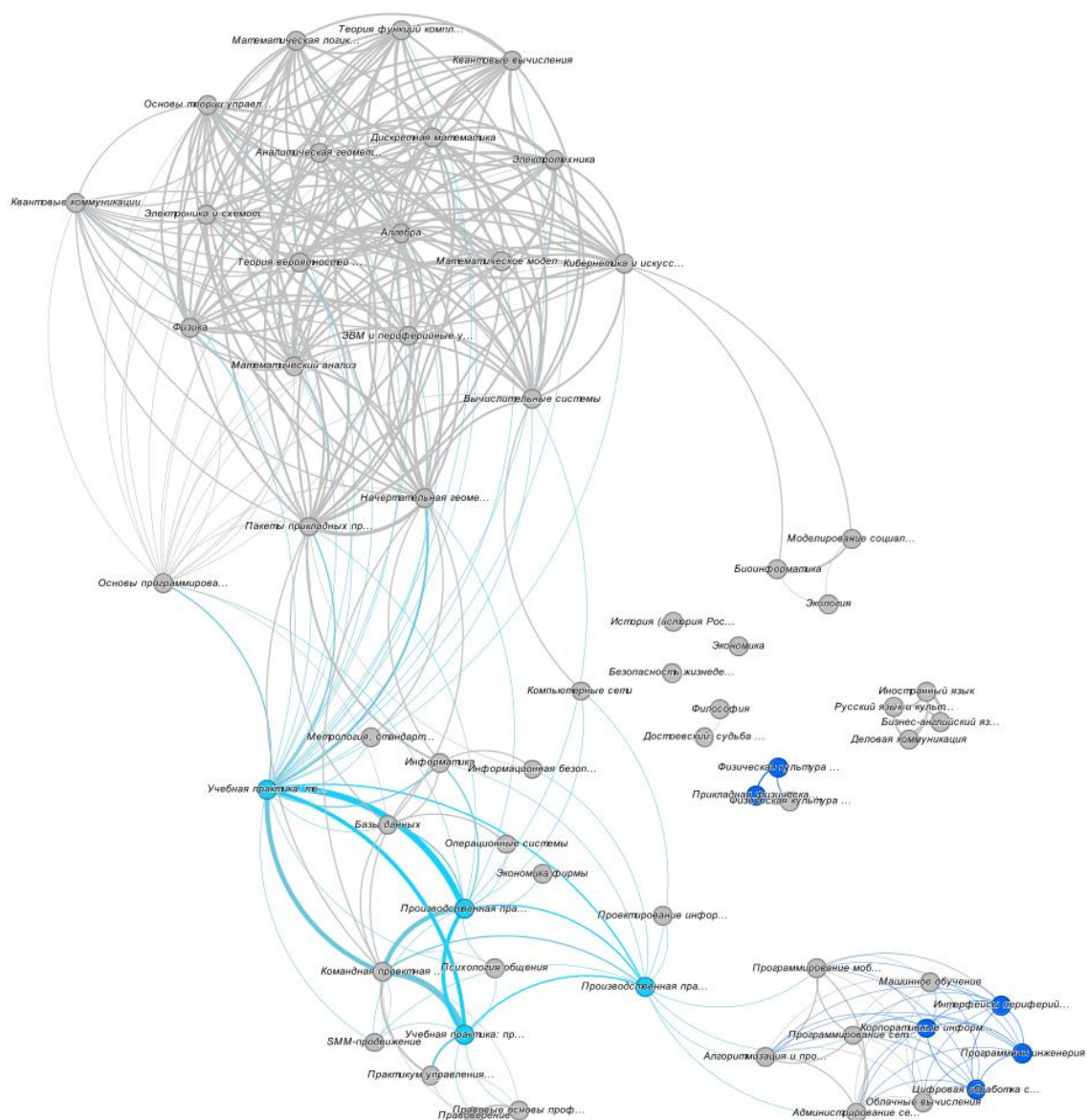


Рис. 4. Модель сети учебного плана ОмГУ.

На рис. 2–4 четко выделяются кластеры, которые образуют между собой узлы по количеству формируемых ими компетенций. Имеются также одиночные дисциплины, которые ни с чем не связаны, потому что в настоящем исследовании не учитывалась «Государственная итоговая аттестация». Для наглядности, чтобы отделить элективные дисциплины и практики от основных дисциплин, они были выделены различными цветами: бирюзовым – практики (учебные, производственные, преддипломные), синим/черным – элективные дисциплины. Отметим что от веса ребра зависит его толщина. Вес ребра увеличи-

вается, если дисциплина участвует в формировании компетенций несколько раз.

Укладка графов была произведена с помощью алгоритма Force Atlas 2, который уже имплементирован в программный продукт. Подборка параметров производилась вручную.

Этап 2. Формирование множества показателей для анализа сетей учебных дисциплин

В ходе исследования было установлено что для определения значимой роли узлов сети учебных дисциплин одного показателя – меры центральности – недостаточно. Универсальной меры для решения таких задач еще не существует. Стоит также отметить значительный вклад ученых в определение мер центральности узлов сети [12–15].

Для исследования узлов сети учебных дисциплин были отобраны следующие значимые меры центральности [16–21]:

- центральность по степени связности (degree centrality);
- центральность по близости к другим узлам (closeness centrality);
- центральность по посредничеству (betweenness centrality);
- центральность по степени влияния (eigenvector centrality).

Центральность по степени связности показывает, как дисциплины, связанные через общие компетенции: чем показатель больше, тем больше формирует дисциплина общих компетенций с другими. Можно предположить, что именно дисциплины, имеющие максимальные значения этого показателя, будут являться профильными и составлять ядро учебной программы.

Центральность по близости измеряет среднее расстояние от дисциплины до всех прочих дисциплин в сети и отражает эффективность взаимодействия дисциплины с остальной частью учебного плана. Высокий показатель свидетельствует о том, что данная дисциплина является центральной и обеспечивает кратчайшие пути доступа ко всему массиву знаний программы.

Центральность по посредничеству показывает, насколько часто дисциплина выступает в роли обязательного переходного звена при движении от одной группы дисциплин к другой. Такие дисциплины выступают в роли ключевых структурных мостов, обеспечивающих связность между различными моду-

лями учебного плана. Нарушение этих связей ведет к изоляции частей учебного плана друг от друга.

Центральность по степени влиятельности является показателем влиятельности дисциплины в сети. В отличие от простой центральности по степени, этот показатель учитывает не только количество прямых связей дисциплины, но и статус ее «соседей»: чем более значимы связанные с ней дисциплины, тем выше ее собственный показатель. Таким образом, дисциплина получает высокое значение не за большое число любых связей, а за связи с ключевыми, центральными элементами сети.

Для исследования графов учебных планов были применены следующие основные метрики [22–24].

1. Средняя степень связности – среднее арифметическое количества связей (входящих и исходящих) всех вершин графа. Характеризует среднее количество междисциплинарных связей на одну дисциплину.

2. Диаметр графа – максимальная длина кратчайшего пути между любой парой вершин в связном графе. Отражает максимальную дистанцию между двумя наиболее удаленными дисциплинами.

3. Плотность графа – отношение фактического количества дуг к максимально возможному в графе с данным числом вершин. Характеризует степень насыщенности учебного плана междисциплинарными связями.

4. Связные компоненты – количество максимальных подграфов, в которых любые две вершины соединены путем. Отражает структурную целостность учебного плана.

5. Модулярность – мера силы разделения сети на кластеры, оценивающая плотность связей внутри групп относительно связей между группами.

6. Средний коэффициент кластеризации – среднее значение локальной плотности связей соседей каждой вершины. Отражает склонность дисциплин к формированию тематических групп.

7. Средняя длина пути – среднее арифметическое длин кратчайших путей между всеми парами вершин. Характеризует среднюю дистанцию между дисциплинами программы.

Этап 3. Анализ графов учебных планов

Проведенный анализ метрик сетевой структуры позволил выявить существенные различия в архитектуре образовательных программ рассматриваемых вузов.

В табл. 1 приведены значения основных метрик графа учебных планов, которые были рассчитаны с помощью встроенных инструментов Gephi.

Табл. 1. Характеристики графов учебных планов.

Метрика	ОмГУ	ОмГТУ	СиБАДИ
Средняя степень связности	10.571	8.237	15.915
Диаметр графа	6	8	5
Плотность графа	0.171	0.142	0.227
Связные компоненты	7	2	4
Модулярность	0.371	0.601	0.49
Средний коэффициент кластеризации	0.886	0.796	0.82
Средняя длина пути	2.388	3.112	2.04

Программа ОмГУ демонстрирует наиболее фрагментированную структуру сети. Ключевым индикатором здесь выступает количество связных компонент, которое является максимальным (7). Это означает, что учебный план не представляет собой единого связного графа, а состоит из нескольких разрозненных подграфов, что может указывать на слабую взаимосвязь между определенными группами дисциплин и наличие изолированных учебных циклов. Несмотря на средние показатели плотности (0.171) и диаметра (6), низкая модулярность (0.371) в сочетании с высокой фрагментацией свидетельствует о низком уровне междисциплинарности, что может затруднить формирование целостной профессиональной картины у обучающихся.

Программа же ОмГТУ отличается принципиально иной организацией, что отражается в показателе модулярности, имеющем наибольшее значение среди рассматриваемых вузов (0.601). Высокая модулярность свидетельствует о четкой кластеризации дисциплин, соответствующих отдельным профессиональным модулям или специализациям. Это подтверждается и тем, что граф имеет

наибольшую среднюю длину пути (3.112) и максимальный диаметр (8). Такая структура предполагает, что учебный план разделен на обособленные тематические блоки, переход между которыми требует прохождения через ряд промежуточных дисциплин. При этом низкое количество связанных компонент (2) говорит о том, что программа в целом едина, но внутренне строго сегментирована.

В свою очередь, СибАДИ демонстрирует показатели, свидетельствующие о высокой степени интеграции учебного процесса. Граф данной программы характеризуется максимальной плотностью связей (0.228) и наименьшим диаметром (4), что указывает на компактность структуры и отсутствие изолированных блоков дисциплин. Высокое значение средней степени узла (15.045) подтверждает, что каждая дисциплина тесно связана с большим количеством других предметов. Такая топология создает условия для глубокой междисциплинарной интеграции компетенций, где знания из одной области быстро транслируются и применяются в смежных курсах, обеспечивая целостное восприятие профессионального профиля и формирования системного мышления.

Однако стоит дополнить приведенные выше выводы с учетом классификаций вузов в Российской Федерации (классический и технический университеты, институт).

Фрагментированная структура для ОмГУ является типовой архитектурой с упором на разнообразие дисциплинарных областей, что позволяет формировать у обучающихся широкий научный кругозор и критическое мышление. Но тем не менее такая структура все же может затруднять формирование сквозных дисциплин.

Топология ОмГТУ и СибАДИ отражает инженерно-отраслевую модель подготовки. Различие заключается лишь в том, что в первом случае структура образовательной программы является каскадной и обучающимся придется пройти через ряд промежуточных дисциплин, в то время как во втором случае структура оптимальна для подготовки кадров, которые могут сразу включиться в производственные процессы без дополнительного обучения.

Этап 4. Анализ учебных дисциплин с помощью сетевых метрик

В табл. 2–5 представлены сравнительные данные по дисциплинам, которые имеются в каждом учебном плане исследуемых вузов, по определенным выше мерам центральности. Такие дисциплины, как учебная/производственная практика и итоговая аттестация, не включены в обзор из соображений целесообразности и полноты эксперимента, так как они будут иметь наибольшие значения большинства показателей в силу их связи с большим числом дисциплин. Были также исключены классические дисциплины, чтобы рассмотреть именно роль профессиональных дисциплин в учебном плане.

Табл. 2. Сравнение дисциплин по степени связности узлов.

Дисциплины	Степень связности		
	ОмГУ	ОмГТУ	СиБАДИ
Базы данных	0.136	0.172	0.246
Операционные системы	0.034	0.155	0.246
Экономика фирмы	0.017	0.172	0.246
Электротехника	0.339	0.138	0.246

Табл. 3. Сравнение дисциплин по близости к другим узлам.

Дисциплины	Близости к другим узлам		
	ОмГУ	ОмГТУ	СиБАДИ
Базы данных	0.001	0.005	0.0
Операционные системы	0.0	0.008	0.0
Экономика фирмы	0.0	0.025	0.042
Электротехника	0.0	0.0	0.009

Табл. 4. Сравнение дисциплин по посредничеству.

Дисциплины	Посредничество		
	ОмГУ	ОмГТУ	СиБАДИ
Базы данных	0.375	0.294	0.397
Операционные системы	0.296	0.286	0.397
Экономика фирмы	0.294	0.356	0.419
Электротехника	0.411	0.392	0.397

Табл. 5. Сравнение дисциплин по степени влиятельности.

Дисциплины	Степень влиятельности		
	ОмГУ	ОмГТУ	СиБАДИ
Базы данных	0.026	0.056	0.001
Операционные системы	0.002	0.048	0.001
Экономика фирмы	0.001	0.076	0.001
Электротехника	0.228	0.07	0.001

Сетевой анализ учебных планов по четырем метрикам центральности выделяет структурные шаблоны, которые традиционные методы могут пропустить. Центральность по степени связности разделяет дисциплины по числу прямых междисциплинарных связей: в ОмГУ максимум у «Электротехники» – 0.339, тогда как в СиБАДИ прикладные дисциплины выровнены на уровне 0.246, что говорит о сбалансированной плотности связей. Центральность по посредничеству устанавливает дисциплины-мосты: «Экономика фирмы» в СиБАДИ (0.042) и ОмГТУ (0.025) связывает тематические кластеры, а в ОмГУ метрика нулевая, следовательно, она не является связующей. Центральность по близости в СиБАДИ лежит в узком диапазоне 0.397–0.419 для всех дисциплин, что характеризует граф как компактную структуру с минимальными дистанциями между узлами, тогда как ОмГУ и ОмГТУ показывают разброс значений, отражающий неоднородную топологию. Центральность по степени влиятельности подтверждает иерархию в ОмГУ, где «Электротехника» (0.228) формирует доминирующее ядро, связанное с другими влиятельными узлами, а в СиБАДИ

метрика минимальна и одинакова (0.001), что свидетельствует о плоской структуре без доминирующих дисциплин.

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что многоаспектный сетевой анализ в качестве диагностического инструмента дает эмпирическую основу для оптимизации архитектуры образовательных программ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были смоделированы графовые модели учебных планов трех вузов г. Омск (ОмГТУ, СибАДИ, ОмГУ) и выполнен их сравнительный анализ с использованием комплекса сетевых метрик и мер центральности (степени связности, посредничества, близости к другим узлам, степени влияния).

Анализ выявил существенные различия в архитектуре образовательных программ, которые коррелируют с ведомственной принадлежностью и моделью подготовки специалистов:

- классический университет (ОмГУ) характеризуется фрагментированной структурой с несколькими слабосвязанными компонентами, что типично для фундаментальной подготовки с широким научным кругозором;
- технический вуз (ОмГТУ) демонстрирует каскадную структуру с высокой модулярностью, где переход между тематическими блоками дисциплин требует прохождения через специализированные «мостовые» курсы;
- отраслевой институт (СибАДИ) обладает наиболее интегрированной и компактной структурой, оптимизированной для быстрой трансляции знаний и формирования системного мышления, необходимого для немедленного включения в производственные процессы.

Применение многоаспектного сетевого анализа подтвердило высокий диагностический потенциал данного подхода. Он позволяет не только количественно оценить междисциплинарную связность, модульность и целостность учебного плана, но и выявить ключевые дисциплины – ядра программы и структурные мосты, критически важные для ее функционирования.

Таким образом, предложенный подход к исследованию УП на основе методов сетевого анализа доказал свою эффективность как средство объективной оценки и обоснованной оптимизации архитектуры образовательных программ,

а также верификации их соответствия заявленным профессиональным компетенциям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голубовский В.Н. Теоретико–методологические основы опережающего профессионального образования: сущность, функции и условия реализации // Психолого–педагогические исследования. 2025. Т. 17. № 4. С. 232–243.

2. Муканова С.Д. Интеграция предметных и педагогических компетенций непрерывного профессионального развития в структуре профессиональной компетентности: методологические основания // Bulletin of the Karaganda University Pedagogy series. 2023. Т. 112. № 4. С. 22–34.

3. Ярычев Н.У. Методологические основания разработки компетентностного подхода в современной педагогике // Мир науки, культуры, образования. 2025. № 1 (110). С. 76–77.

4. Частикова В.А., Псеуш А.Г. Интеллектуальный анализ данных при построении индивидуальных образовательных траекторий // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. 2021. № 2 (281). С. 66–71.

5. Мальтекбасов М.Ж., Прокофьева М.А., Ескендилов Б.Н., Нурбосынова Г.С. Особенности применения теории графов при проектировании образовательной траектории в вузе // Международный журнал экспериментального образования. 2014. № 1–1. С. 102–105.

6. Гафиятуллина А.Р., Торкунова Ю.В. Проблемы и методы построения индивидуальной образовательной траектории выпускника вуза в условиях индустрии 4.0 // Вестник РМАТ. 2023. № 1. С. 37–41.

7. Зыкова Т.В., Кытманов А.А., Носков М.В., Халтурин Е.А. Применение силового алгоритма визуализации графов для анализа учебных планов образовательных программ высшего образования // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2023. Т. 19, № 1. С. 104–116.

<https://doi.org/10.25559/SITITO.019.202301.104–116>. EDN KZH0WJ.

8. Зыкова Т.В., Вайнштейн Ю.В., Носков М.В. О графовой модели учебного плана образовательной программы // Информатизация образования и методика электронного обучения: цифровые технологии в образовании: Матери-

алы VIII Международной научной конференции: в трех частях. Том Часть 1, Красноярск, 24–27 сентября 2024 года. Красноярск: Красноярский государственный педагогический университет им. В.П. Астафьева, 2024. С. 109–113.

9. *Зыкова Т.В., Вайнштейн Ю.В., Носков М.В.* Моделирование и визуализация данных учебных планов образовательных программ. 2024.

10. *Халтурин Е.А. и др.* Программные методы обработки, анализа и визуализации учебных планов // *Russian Technological Journal*. 2026. Т. 14. № 2. С. 42–56.

11. *Ольгина И.Г.* Система поддержки принятия решений при выборе источников информации в сетях цитирования // *Электронные библиотеки*. 2025. Т. 28. № 1. С. 76–96.

12. *Bonacich P., Lloyd P.* Eigenvector-like measures of centrality for asymmetric relations // *Social Networks*. 2001. Vol. 23, No. 3. P. 191–201.
[https://doi.org/10.1016/s0378-8733\(01\)00038-7](https://doi.org/10.1016/s0378-8733(01)00038-7)

13. *Katz L.* A new status index derived from sociometric analysis // *Psychometrika*. 1953. Vol. 18, No. 1. P. 39–43. <https://doi.org/10.1007/bf02289026>

14. *Freeman L.C.* A Set of Measures of Centrality Based on Betweenness // *Sociometry*. 1977. Vol. 40, No. 1. P. 35–41. <https://doi.org/10.2307/3033543>

15. *Kleinberg J.M.* Authoritative sources in a hyperlinked environment // *Journal of the AC*. 1999. Vol. 46, No. 5. P. 604–632.
<https://doi.org/10.1145/324133.324140>

16. *Durand G., Belacel N., LaPlante F.* Graph theory based model for learning path recommendation // *Information Sciences*. 2013. P. 10–21.

17. *Landherr A., Friedl B., Heidemann A.* A Critical review of centrality measures in social networks // *Business and Information Systems Engineering*. 2010. Vol. 2, No. 6. P. 371–385. <https://doi.org/10.1007/s12599-010-0127-3>

18. *Das K., Samanta S., Pal M.* Study on centrality measures in social networks: a survey // *Social Network Analysis and Mining*. 2018. Vol. 8. Article number 13. 122. <https://doi.org/10.1007/s13278-018-0493-2>

19. *Дегтерев Д.А.* Сетевой анализ международных отношений // *Вестник С.-Петерб. ун-та. Сер. 6, Политология. Междунар. отношения*. 2015. № 4. С. 119–138.

20. *Bonacich P., Lloyd P.* Eigenvector-like measures of centrality for asymmetric relations // *Social Networks*. 2001. Vol. 23, No. 3. P. 191–201.

[https://doi.org/0.1016/S0378-8733\(01\)00038-7](https://doi.org/0.1016/S0378-8733(01)00038-7)

21. *Frąszczak D.* Identifying Network Propagation Sources Using Advanced Centrality Measures // *Entropy*. 2025. Vol. 27. No. 9. P. 948.

22. *Newman M.E.J., Girvan M.* Finding and Evaluating Community Structure in Networks // *Phys. Rev. E*. 2004. Vol. 69, No. 2. P. 026113 (15 pp.).

<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.69.026113>

23. *Lancichinetti A., Fortunato S.* Limits of Modularity Maximization in Community Detection // *Phys. Rev. E*. 2011. V. 84. № 6. P. 066122 (8 pp.).

<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.84.066122>

24. *Miasnikov P., Prokhorenkova L., Shestopaloff A.Y., Raigorodskii A.* A Statistical Test of Heterogeneous Subgraph Densities to Assess Clusterability // *Learning and Intelligent Optimization (13th Int. Conf. LION'13. Chania, Crete, Greece. May 27–31, 2019. Revised Selected Papers)*. *Lect. Notes Comput. Sci.* V. 11968. Cham: Springer, 2000. P. 17–29. https://doi.org/10.1007/978-3-030-38629-0_2

THE USE OF GRAPH MODELS OF CURRICULA FOR THE ANALYSIS OF EDUCATIONAL PROGRAMS IN HIGHER EDUCATION SPECIALTIES

D. A. Li¹ [0009-0001-0961-8021], I. G. Olgina² [0000-0002-9932-4552]

¹*Omsk State Technical University, Omsk, Russia*

²*Omsk Branch of the Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration Limited Liability Company «Neopoisk», Omsk, Russia*

¹li@satorydigital.ru, ²inna_olgina@mail.ru

Abstract

The design of curricula in the context of the dynamics of educational standards is shifting from a static set of disciplines to system modeling. This approach should take into account multilevel relationships and the logic of forming cross-cutting competencies. The purpose of the research is to create and test methodological tools for the analysis of educational programs of universities based on net-

work analysis methods. The curriculum is formalized in the form of an undirected graph, where the vertices are disciplines, and the edges are connections through common competencies. The work uses a multidimensional network analysis, including the calculation of centrality measures (degree, betweenness, closeness, eigenvector) and key topological metrics: density, modularity, diameter, and clustering coefficient. The empirical base was made up of data from the curricula of three universities in Omsk. The analysis revealed significant structural and topological differences in the architecture of educational programs due to their departmental affiliation and target training models. Network metrics make it possible to quantify the interdisciplinary connectivity and modularity of programs, which is not available for traditional approaches. The results obtained confirm the high diagnostic potential of network analysis for sound optimization of curricula and verification of compliance with professional competencies.

Keywords: *network analysis, academic disciplines, graph, social networks.*

REFERENCES

1. Golubovsky V.N. Theoretical and methodological foundations of advanced professional education: essence, functions and conditions of implementation // Psychological and pedagogical research. 2025. Vol. 17. No. 4. P. 232–243.
2. Mukanova S.D. Integration of subject and pedagogical competencies of continuous professional development in the structure of professional competence: methodological foundations // Bulletin of the Karaganda University Pedagogy series. 2023. Vol. 112. No. 4. P. 22–34.
3. Yarychev N.U. Methodological foundations of the development of a competence approach in modern pedagogy // The world of science, culture, education. 2025. № 1 (110). P. 76–77.
4. Chastikova V.A., Pseush A.G. Data mining in the construction of individual educational trajectories // Bulletin of the Adygea State University. Series 4: Natural, mathematical and technical sciences. 2021. № 2 (281). P. 66–71.
5. Maltekbasov M.J., Prokofieva M.A., Eskendirov B.N., Nurbosynova G.S. Features of graph theory application in the design of educational trajectory in higher education // International Journal of Experimental Education. 2014. No. 1–1. P. 102–105.

6. *Gafiyatullina A.R., Torkunova Yu.V.* Problems and methods of constructing an individual educational trajectory of a university graduate in the context of industry 4.0 // *Bulletin of the RMAT*. 2023. № 1. P. 37–41.

7. *Zykova T.V., Kytmanov A.A., Noskov M.V., Khalturin E.A.* Application of a power graph visualization algorithm for analyzing curricula of educational programs of higher education // *Modern information technologies and IT education*. 2023. Vol. 19, No. 1. P. 104–116. <https://doi.org/10.25559/SITITO.019.202301.104–116>. EDN KZHOWJ.

8. *Zykova T.V., Weinstein Yu.V., Noskov M.V.* On the graph model of the curriculum of an educational program // *Informatization of education and e-learning methods: digital technologies in education: Proceedings of the VIII International Scientific Conference: in three parts. Volume Part 1, Krasnoyarsk, September 24–27, 2024*. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Pedagogical University named after V.P. Astafiev, 2024. P. 109–113.

9. *Zykova T.V., Vainshtein Yu.V., Noskov M.V.* Modeling and visualization of curriculum data for educational programs. 2024.

10. *Khalturin E.A. and others.* Software methods for processing, analyzing and visualizing curricula // *Russian Technological Journal*. 2026. Vol. 14. No. 2. P. 42–56.

11. *Holgina I.G.* Decision support system when choosing information sources in citation networks // *Electronic libraries*. 2025. Vol. 28. No. 1. P. 76–96.

12. *Bonacich P., Lloyd P.* Eigenvector-like measures of centrality for asymmetric relations // *Social Networks*. 2001. Vol. 23, No. 3. P. 191–201. [https://doi.org/10.1016/s0378-8733\(01\)00038-7](https://doi.org/10.1016/s0378-8733(01)00038-7)

13. *Katz L.* A new status index derived from sociometric analysis // *Psychometrika*. 1953. Vol. 18, No. 1. P. 39–43. <https://doi.org/10.1007/bf02289026>

14. *Freeman L.C.* A Set of Measures of Centrality Based on Betweenness // *Sociometry*. 1977. Vol. 40, No. 1. P. 35–41. <https://doi.org/10.2307/3033543>

15. *Kleinberg J.M.* Authoritative sources in a hyperlinked environment // *Journal of the AC*. 1999. Vol. 46, No. 5. P. 604–632. <https://doi.org/10.1145/324133.324140>

16. *Durand G., Belacel N., LaPlante F.* Graph theory based model for learning path recommendation // *Information Sciences*. 2013. P. 10–21.

17. Landherr A., Friedl B., Heidemann A. A Critical review of centrality measures in social networks // *Business and Information Systems Engineering*. 2010. Vol. 2, No. 6. P. 371–385. <https://doi.org/10.1007/s12599-010-0127-3>
18. Das K., Samanta S., Pal M. Study on centrality measures in social networks: a survey // *Social Network Analysis and Mining*. 2018. Vol. 8. Article number 13. 122. <https://doi.org/10.1007/s13278-018-0493-2>
19. Degterev D.A. Network analysis of international relations / D.A. Degterev // *Bulletin of St. Petersburg University, Series 6, Political Science. International relationships*. 2015. No. 4. P. 119–138.
20. Bonacich P., Lloyd P. Eigenvector-like measures of centrality for asymmetric relations // *Social Networks*. 2001. Vol. 23, No. 3. P. 191–201. [https://doi.org/10.1016/S0378-8733\(01\)00038-7](https://doi.org/10.1016/S0378-8733(01)00038-7)
21. Frąszczak D. Identifying Network Propagation Sources Using Advanced Centrality Measures // *Entropy*. 2025. Vol. 27. No. 9. P. 948.
22. Newman M.E.J., Girvan M. Finding and Evaluating Community Structure in Networks // *Phys. Rev. E*. 2004. Vol. 69, No. 2. P. 026113 (15 pp.). <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.69.026113>
23. Lancichinetti A., Fortunato S. Limits of Modularity Maximization in Community Detection // *Phys. Rev. E*. 2011. V. 84. № 6. P. 066122 (8 pp.). <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.84.066122>
24. Miasnikov P., Prokhorenkova L., Shestopaloff A.Y., Raigorodskii A. A Statistical Test of Heterogeneous Subgraph Densities to Assess Clusterability // *Learning and Intelligent Optimization (13th Int. Conf. LION'13. Chania, Crete, Greece. May 27–31, 2019. Revised Selected Papers)*. *Lect. Notes Comput. Sci.* V. 11968. Cham: Springer, 2020. P. 17–29. https://doi.org/10.1007/978-3-030-38629-0_2

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



ЛИ Данил Александрович – ассистент кафедры «Математические методы и информационные технологии в экономике» Омского государственного технического университета. Область научных интересов: сетевой анализ, теория графов, моделирование. Число научных публикаций – 3.

Danil Aleksandrovich LI – assistant at the Department of Mathematical Methods and Information Technologies in Economics at Omsk State Technical University. Research interests: network analysis, graph theory, modeling. The number of publications – 3.

email: li@satorydigital.ru

ORCID: 0009-0001-0961-8021



ОЛЬГИНА Инна Геннадьевна – канд. техн. наук, региональный директор по развитию ООО «Неопоиск», доцент кафедры экономики и управления Омского филиала Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации. Область научных интересов: теория графов, применение методов системного анализа для исследования сетей цитирования, цифровые технологии в работе библиотек. Число научных публикаций – 27.

Inna Gennadevna OLGINA – Regional Director for Development Limited Liability Company «Neopoisk», associate professor of the Department of Economics and Management Omsk Branch of the Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration. Research interests: graph theory, application of systems analysis methods for the citation networks research, digital technologies in the work of libraries. The number of publications – 27.

email: inna_olgina@mail.ru

ORCID: 0000-0002-9932-4552

Материал поступил в редакцию 2 июня 2026 года

МЕТОД ИЗВЛЕЧЕНИЯ ГЛАВНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И ФОРМУЛ ИЗ ТЕКСТОВ НАУЧНЫХ СТАТЕЙ НА ОСНОВЕ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ

Э. В. Саитов¹ [0009-0009-1980-8740], О. А. Невзорова² [0000-0001-8116-9446]

^{1, 2}Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

¹saitoverik@mail.ru, ²onevzoro@gmail.com

Аннотация

Представлен метод извлечения главных результатов и формул из текстов математических научных статей на основе большой языковой модели DeepSeek. Разработанный метод состоит из следующих шагов: формирование базы аннотаций статей, выделение из них формулировок главных результатов, поиск этих результатов в основном тексте, извлечение в найденных фрагментах ключевых формул с переводом в LaTeX.

Получены оценки построенного решения по метрикам точности, полноты и F-меры. Средние значения F-меры по тестовой коллекции математических статей для основных результатов и связанных с ними формул равны соответственно 0.93459 и 0.9294.

В качестве способа хранения полученных главных результатов и формул предложена система управления базами данных MySQL, приведено описание соответствующей структуры базы данных.

Ключевые слова: *большая языковая модель, математическая статья, основная формула, главная формула, формат LaTeX, извлечение формулы, семантический поиск, аннотирование формул, обработка PDF-документов, информационный поиск, искусственный интеллект, наукометрический анализ.*

ВВЕДЕНИЕ

Автоматизированное извлечение и семантический анализ ключевых результатов из научных публикаций представляют собой серьезную исследовательскую проблему в современную эпоху. Основные результаты математических работ, как правило, представляются в виде формул. Прямое извлечение

этих формул из формата PDF, стандартного для научной коммуникации, и последующее определение роли и значимости формул в контексте всей работы сопряжены с рядом технических и семантических сложностей.

Развитие больших языковых моделей (Large Language Model, LLM), обладающих продвинутыми способностями к пониманию контекста и генерации структурированных ответов, создает принципиально новые возможности для решения указанной проблемы.

В настоящей работе предложен и оценен подход к извлечению из математических статей главных результатов и связанных с ними формул с использованием LLM DeepSeek¹. Разработанный метод использует возможности LLM как семантического поисковика, что обеспечивает поиск как внутри аннотации статьи, так и в ее содержимом. Результатами поиска внутри аннотации являются описания основных результатов статьи. Далее выполняется поиск выделенных из аннотации результатов внутри тела статьи, локализация соответствующих фрагментов и извлечение формул, связанных с основными результатами.

Структура статьи такова: в разделе 1 дан обзор основных подходов и методов, применяемых для решения задачи анализа математических документов; в разделе 2 описан разработанный метод извлечения главных результатов и формул из текстов математических научных статей; в разделе 3 даны оценки разработанного метода, в разделе 4 описана концепция формирования базы данных хранения полученных результатов; в заключении представлены основные выводы и направления будущих разработок.

1. БЛИЗКИЕ ПО ТЕМАТИКЕ РАБОТЫ

Исследования, связанные с построением методов обработки математических текстов, достаточно широко представлены в литературе. Представим наиболее значимые результаты.

Цикл работ по применению математических онтологий в задачах обработки математических текстов включает [1–4].

В [1] рассмотрены проблемы семантического аннотирования формул в формате PDF. Авторы предложили метод, который комбинирует синтаксический анализ внутренней структуры формулы (построение дерева операторов)

¹ <https://chat.deepseek.com>

с лингвистическим анализом окружающего ее текста, и сопоставление элементов формулы с концептами математической онтологии OntoMath^{PRO}. В [2] описаны семантические сервисы цифровой экосистемы OntoMath, применяемые в задачах математического образования. Функционал этих сервисов основан на использовании математических онтологий OntoMath^{Edu} и OntoMath^{PRO}. В частности, для задач математического образования разработаны сервисы семантического поиска по математическим формулам и семантического аннотирования учебных материалов, что позволило представить последние как интерактивные элементы, связанные с пояснениями и определениями. В работе [3] методы, ранее разработанные в [1], применены для аннотирования материалов научной конференции, что подтверждает масштабируемость и универсальность подхода к семантической разметке для различных видов математических PDF-документов. В [4] предложен сервис семантического поиска по коллекции математических статей в формате PDF. Поиск формул выполняется посредством поиска понятий, входящих в математическую формулу. В качестве источника понятий используется онтология профессиональной математики OntoMath^{PRO}. Результаты поиска не зависят от авторских обозначений переменных формулы и содержат все формулы, в которых присутствует понятие из поискового запроса.

В [5] рассмотрена задача поиска математических формул, имеющих древовидную структуру. Предложены три типа мер, представляющих отличительные особенности семантического сходства математических формул, разработаны эффективные алгоритмы на основе хеширования для приближенных вычислений. Выполнены эксперименты с использованием набора данных NTCIR-11 Math-2 Task – крупномасштабной тестовой коллекции для поиска математической информации, содержащей около 60 млн формул. Показано, что предложенный метод повышает точность поиска, сохраняя при этом высокую масштабируемость и эффективность по времени выполнения.

В обзорной работе [6] даны классификация и анализ ранних математических поисковых систем. Авторы систематизировали системы по архитектуре и типу поддерживаемых запросов. Главным результатом стало выявление имеющихся фундаментальных проблем: неэффективность при обработке концеп-

туальных (неточных) запросов и семантический разрыв между текстом и формулой.

Работа [7] относится к области семантических веб-технологий и связана с успешной интеграцией более 100 тыс. математических объектов в глобальную базу знаний Wikidata.

В настоящее время активно разрабатываются нейросетевые методы анализа математических документов.

В статье [8] рассмотрен метод извлечения математических концептов из текста с оценкой F-меры, равной 0.87, комбинирующий синтаксический парсинг зависимостей (для анализа структуры предложения) с контекстными языковыми моделями BERT. В [9] описан метод векторизации математической лексики с применением векторной модели word2vec, обученной на крупном корпусе математических текстов из ресурса arXiv. Конкретным результатом стало создание “math-aware” эмбеддингов, использование которых повысило точность классификации математических документов на 5–10%.

Обзорная статья [10] систематизирует более 150 современных методов извлечения информации, основанных на глубоком обучении. Авторы классифицируют методы по типам нейросетевых архитектур (например, RNN, CNN, Transformers) и решаемым задачам (NER, relation extraction). Этот обзор задает общий контекст развития решаемых задач в области машинного обучения.

В статьях [11, 12] представлена реализация гибридной поисковой системы MathIRs, объединяющей различные методы. Одним из интересных результатов является использование векторных представлений формул (Formula Embedding). Модуль встраивания формул предлагаемой системы использует таблицу битовой информации для преобразования математических формул, содержащихся в научных документах, в бинарные векторы формул. Каждый установленный бит вектора формулы обозначает наличие определенной математической сущности. Математический запрос пользователя преобразуется в вектор запроса аналогичным образом и извлекаются соответствующие релевантные документы. Релевантность результата поиска характеризуется степенью сходства между индексированным вектором формулы и вектором запроса. Этот подход продемонстрировал эффективность в поиске точных формул запроса, родительских формул, подформул и похожих формул. Модификация

критерия меры сходства и включение поддержки индексирования и поиска текстовых терминов являются важными будущими модификациями, которые могут еще больше повысить эффективность поиска.

Экспериментальное исследование [13] доказало важность использования мультимодальности. Авторы показали, что комбинирование визуальных признаков формулы (ее расположения на странице – layout) с семантическими признаками дает значительный прирост точности поиска. Конкретным результатом стало повышение этой точности на 15–20% по сравнению с использованием только одного типа признаков.

В [14] представлен итоговый отчет по проекту DFG “MathIR” (2018–2022). В его рамках были исследованы новые подходы и технологии повышения доступности математического контента и его семантической информации для широкого спектра приложений информационного поиска. Для достижения этой цели решались три основные исследовательские задачи: (1) синтаксический анализ математических выражений, (2) семантическое обогащение математических выражений и (3) оценка с использованием метрик качества и демонстраторов. Проект MathIR внес значительный вклад в исследования различных задач и систем математического информационного поиска, включая системы обнаружения плагиата и рекомендации, поисковые системы, системы первой помощи для математических типов данных, системы ответов на математические вопросы и обучения, автоматическую проверку правдоподобности математических выражений в Википедии, автоматическую вычислимость математического контента с использованием систем компьютерной алгебры (CAS).

В работе [15] предложен комплексный фреймворк, интегрирующий компьютерное зрение (для детектирования и распознавания символов) и лингвистический анализ (для классификации). Конкретными результатами на публичном датасете стали точность детектирования формул в 96.7% и точность распознавания их структуры в 89.2%. Этот фреймворк решает задачу нижнего уровня – перевод формулы из изображения в структурированный формат, что является необходимым этапом обработки математических текстов.

В [16] выполнена масштабная систематизация всей области Mathematical Language Processing (MLP). Авторы проанализировали свыше 200 работ, пред-

ложив единую классификацию по задачам (распознавание, разбор, поиск, генерация), методам и наборам данных.

Исследование [17] посвящено созданию предобученной языковой модели MathBERT, специально адаптированной для математики. Для обучения представлениям формул выполнялись две задачи предварительного обучения: языковое моделирование маскированных токенов (masked language modeling, MLM) и предсказание соответствия контекста (context correspondence prediction, CCP). В качестве входных данных были выбраны деревья операторов (operator trees) – иерархические структуры, представляющие математической формулы. Для обучения был подготовлен большой набор данных, содержащий более 8.7 млн пар «формула – контекст», извлеченных из научных статей, размещенных на arXiv.org¹. Модель была оценена по трем задачам, включая поиск математической информации, классификацию тем формул и генерацию заголовков формул. Экспериментальные результаты показали, что MathBERT значительно превосходит существующие методы по всем трем задачам.

В работе [18] решена критическая проблема неоднозначности. Авторы разработали метод семантификации идентификаторов, который анализирует контекст для определения смысла символа (например, что означает "f" в конкретной статье). Значимым результатом стало достижение точности в 88.5% на задаче разрешения неоднозначности.

В [19] предложена модель, которая строит совместные векторные представления (эмбеддинги) для формулы и ее текстового контекста. Получено улучшение точности поиска релевантных формул на 12%.

Обзор [20] сфокусирован на применении LLM в информационном поиске. Авторы проанализировали 85 работ, систематизировав паттерны использования LLM (например, переформулирование запросов, реранжирование) и оценили прирост эффективности. Сделан вывод о возможном увеличении метрики nDCG до 15% при грамотном использовании LLM.

Таким образом, можно заключить, что существующие работы детально решают отдельные подзадачи: высокоточное извлечение и аннотирование всех формул, создание эффективных алгоритмов поиска по формулам, разрешение неоднозначности или построение векторных моделей. Однако задача целенаправленного автоматического выделения именно главных формул статей, ос-

нованного на понимании ее основных результатов и их иерархической связи с текстом, по-прежнему остается нерешенной.

Предлагаемый нами подход, направлен на решение указанной задачи. Мы используем большую языковую модель DeepSeek не как узкоспециализированный инструмент для одной операции, а как универсальное ядро для сквозного семантического анализа, которое последовательно выстраивает связи от аннотации к конкретным формальным утверждениям. Экспериментальная оценка на коллекции из 50 статей с использованием метрик точности, полноты и F-меры подтвердила эффективность такого подхода для создания структурированных баз знаний, пригодных для интеграции в современные системы семантического поиска и анализа научной литературы.

2. ОПИСАНИЕ РАЗРАБОТАННОГО МЕТОДА

Целью проведенного исследования стала разработка метода автоматизированного извлечения основных математических результатов и формул из текстов научных публикаций с применением современных больших языковых моделей, в частности модели DeepSeek. Практическим результатом применения разработанного метода является подготовка базы данных, содержащей метаданные математических статей. Метаданные включают основные результаты, главные формулы, связанные с основными результатами, фрагменты текста с главными формулами с указанием логических единиц (леммы, теоремы и др.) и страниц документа, а также аннотацию статьи.



Рис. 1. Схема разработанного решения.

Решение построено на последовательном вызове трех разработанных скриптов для выполнения задач каждого из выделенных этапов – построения выборки статей, извлечения метаданных и выделения основных результатов и соответствующих формул из аннотаций статей. Схема разработанного решения,

включающего анализ математических статей и формирование базы данных, представлена на рис. 1.

На первом этапе формируется выборка научных статей на основе первого разработанного скрипта. Выборка содержит статьи в формате Portable Document Format (PDF). Скрипт переходит на портал Math-Net.ru и по заданным параметрам фильтра (рис. 2) осуществляет поиск и извлечение pdf-файлов научных статей. Извлеченные файлы записываются в папку «Научные статьи».

The screenshot shows the Math-Net.Ru website with a search form titled "Поиск публикаций". The form includes the following fields and options:

- Журнал:** A dropdown menu currently set to "все журналы".
- Ключевые слова:** A text input field.
- в:** A dropdown menu currently set to "названии".
- Авторы:** A text input field.
- Организация:** A text input field.
- Финансовая поддержка:** A text input field.
- Номер гранта:** A text input field.
- Том:** Two input fields labeled "с" and "по".
- Год:** Two input fields labeled "с" and "по".

At the bottom of the form are two buttons: "Искать" (Search) and "Очистить поля" (Clear fields). On the left side of the page, there is a sidebar with navigation links: "Главная страница", "О проекте", "Программное обеспечение", "Классификаторы", "Полезные ссылки", "Пользовательское соглашение", "Поиск публикаций", "Поиск ссылок", "RSS", "Текущие выпуски", "Архивные выпуски", "Что такое RSS", and a "Персональный вход" section with "Логин:" and "Пароль:" fields, a "Запомнить пароль" checkbox, and a "Войти" button.

Рис. 2. Фильтры поиска статей на портале Math-Net.ru.

Вторым этапом является извлечение метаданных статей с помощью второго скрипта. Для каждого файла из папки «Научные статьи» скрипт формирует запрос к модели DeepSeek R1 по протоколу API (Application Programming Interface). Модель DeepSeek R1 обрабатывает запрос и передает ответ на вход скрипту по протоколу API. Скрипт выполняет парсинг ответа и записывает результаты в таблицу «Статья».

На третьем этапе для каждого файла из таблицы «Статья» третий скрипт извлекает содержимое поля «Аннотация» и передает это содержимое по протоколу API на вход модели DeepSeek R1. Модель DeepSeek R1 обрабатывает запрос, анализирует содержимое поля «Аннотация» и передает ответ на вход скрипту по протоколу API. Скрипт выполняет парсинг ответа и записывает его в таблицы «Результат» и «Формула».

Все этапы метода выполняются автоматически с предварительной ручной настройкой некоторых параметров, таких как указание фильтров отбора статей на первом этапе, настройка даты начала работы и периодичности запуска скрипта.

2.1. ПОДГОТОВКА ДАННЫХ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве данных для исследования были отобраны 50 научных статей с портала Math-Net.ru (<https://www.mathnet.ru/>) из различных разделов математики: это дифференциальные уравнения, математический анализ, теория вероятностей и математическая статистика

Для проводимого исследования была выбрана большая языковая модель DeepSeek из-за своей доступности на территории Российской Федерации, а также из-за высокой релевантности ответов, выдаваемых на запросы, вводимые пользователем, по сравнению с другими языковыми моделями.

2.2. ИЗВЛЕЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ СТАТЬИ ИЗ АННОТАЦИИ

Источником основных результатов, представленных в статье, является ее аннотация. Она присоединяется в виде текста либо файла формата PDF к запросу большой языковой модели.

Далее во всех приводимых примерах взяты результаты из области обыкновенных дифференциальных уравнений, полученные в статье [21].

В рамках формирования запросов к LLM был применен подход к формулированию запроса, известный как zero-shot (запрос «с нулевыми примерами»). Суть этого подхода заключается в том, что большая языковая модель получает задачу, сформулированную на естественном языке, без какого-либо предварительного обучения на размеченных данных, специфичных для этой задачи, и без предоставления примеров ожидаемого выполнения непосредственно в теле запроса. Модель должна решить поставленную задачу, опираясь исключительно на обобщенные знания и языковые паттерны, приобретенные в процессе ее масштабного предобучения на разнородных текстовых корпусах.

Пример запроса к LLM DeepSeek на выделение главных результатов из аннотации, к указанной выше статье, представлен в листинге 1.

Листинг 1. Промт 1. Выделение главных результатов из аннотации.

Дана следующая аннотация:

Получена формальная классификация типичных локальных перестроек неявного обыкновенного дифференциального уравнения в его особых точках при изменении одного внешнего параметра. Она состоит из четырех нормальных форм, каждая из которых содержит функциональный инвариант. Доказано, что любую деформацию квадратичного по производной уравнения в классе контактной эквивалентности, при которой оно остается квадратичным по производной, можно получить с помощью деформации независимой и зависимой переменных. На обобщении этого результата для семейств уравнений основана наша классификация. В качестве ее приложения получена формальная классификация типичных локальных перестроек на плоскости линейного уравнения смешанного типа с частными производными второго порядка в точках, где области эллиптичности и гиперболичности испытывают морсовские перестройки.

Выделить из данной аннотации основные результаты, полученные в ходе исследования.

Главные результаты, выделенные из аннотации статьи с помощью модели DeepSeek, приведены в листинге 2.

Модель DeepSeek верно выделила результаты из аннотации загруженной статьи, а также дала подробное описание каждого результата.

Листинг 2. Ответ модели на промт 1.

Основные результаты исследования, выделенные из аннотации:

1. **Формальная классификация типичных локальных перестроек** неявного обыкновенного дифференциального уравнения (ОДУ) в его особых точках при изменении одного внешнего параметра. Классификация включает:
 - Четыре нормальные формы, каждая из которых содержит функциональный инвариант.
2. **Доказательство возможности сведения деформаций** квадратичного по производной уравнения к деформациям независимой и зависимой переменных в классе контактной эквивалентности.
3. **Обобщение этого результата** на семейства уравнений, что легло в основу предложенной классификации.
4. **Применение классификации** к формальному описанию типичных локальных перестроек на плоскости для линейного уравнения смешанного типа (с частными производными второго порядка) в точках, где области эллиптичности и гиперболичности претерпевают морсовские перестройки.

Таким образом, ключевые достижения работы включают:

- Классификацию перестроек неявных ОДУ,

- Теоретическое обоснование сведения деформаций,
- Приложение результатов к уравнениям смешанного типа.

2.3. ЛОКАЛИЗАЦИЯ ФРАГМЕНТОВ ТЕКСТА С ОСНОВНЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ

На следующем этапе решалась задача локализации фрагментов текста, содержащих основные результаты и связанные с ними формулы, посредством построения запросов к LLM.

Были сформулированы следующие требования к запросу к LLM. В качестве формата формул, выводимых в ответе, был выбран формат LaTeX. Требовалось также дать описание каждой переменной в выделенной формуле. При этом, если описание переменной не дано явно в тексте, LLM должна была найти описание в другом источнике с указанием этого источника. Кроме того, требовалось в ответе на запрос вывести ссылку в формате «страница статьи, на которой находится формула → тип логического элемента с номером (например, лемма, теорема и др.)». Текст запроса к LLM для выделения фрагментов текста и основных формул представлен в листинге 3.

Листинг 3. Пример промпта 2. Фрагмент текста и основные формулы

Статья 49.pdf

Выделить из текста статьи фрагменты текста, содержащие элементы выделенных из аннотации основных результатов. Фрагменты текста должны быть взяты из текста статьи. Необходимо выделить фрагменты текста по каждому полученному из аннотации результату. Выделить в найденных фрагментах математические формулы, связанные с основными результатами по списку результатов. В одном фрагменте может быть несколько основных формул. Формулы и переменные должны быть записаны в формате LaTeX, например, z_k . Дать описание каждой переменной, указанной в формуле, в формате LaTeX. Описание должно быть дано снизу формул и содержать слово "где". Если описание переменной формулы не содержится в тексте статьи, дать ссылку на внешний источник, откуда было взято описание. Ссылка на внешний источник должна располагаться после описания переменной и содержать раздел и номер страницы источника, откуда было взято описание. Также под каждой формулой указать ссылку в формате "Страница статьи, на которой находится формула --> Тип утверждения с номером (Например, лемма, теорема и т.п.)". Отчет страниц в статье начинать с первой страницы файла pdf. Вот пример, как должны быть представлены формулы в формате LaTeX:

```
\begin{equation}
```

```
-\Delta u(x) - 2(a u_{x_1}(x) + b u_{x_1}(-x/p))_{x_2} = f(x)
```

\end{equation}

\begin{equation}

$\xi_1^2 + \xi_2^2 + 2\xi_1\xi_2 \operatorname{Re}(a \pm b\lambda) > 0$

\end{equation}

Ответ модели DeepSeek на введенный запрос показан на листингах 4–7.

Листинг 4. Ответ модели на промпт 2 для основного результата 1 из аннотации (см. листинг 2): Фрагмент текста и основные формулы.

Основные результаты и соответствующие фрагменты текста статьи

1. Формальная классификация типичных локальных перестроек неявного ОДУ

Фрагмент текста:

"Получена формальная классификация типичных локальных перестроек неявного обыкновенного дифференциального уравнения в его особых точках при изменении одного внешнего параметра. Она состоит из четырех нормальных форм, каждая из которых содержит функциональный инвариант."

Математические формулы:

\begin{equation}

$\pm(y')^2 \pm x^2 + z^2 = \varepsilon + c(\varepsilon)z^3, \quad \text{где } z$

$= y - \frac{1}{2}xy'$

\end{equation}

где:

- y' – производная зависимой переменной y по независимой переменной x ,
- x, y – независимая и зависимая переменные,
- ε – внешний параметр,
- $c(\varepsilon)$ – функциональный инвариант.

Ссылка:

Страница 8 --> Теорема 1

Листинг 5. Ответ модели на промпт 2 для основного результата 2 из аннотации (см. листинг 2): фрагмент текста и основные формулы.

2. Доказательство возможности сведения деформаций квадратичного ростка

Фрагмент текста:

"Доказано, что любую деформацию квадратичного по производной-ростка уравнения в классе контактной эквивалентности, при которой он остается квадратичным по производной, можно получить с помощью деформации независимой и зависимой переменных."

Математические формулы:

```
\begin{equation}
f(x, y, p) = 0, \quad \text{где } f(a_0) = \partial_p f(a_0) = 0 \text{ и }
\partial_p^2 f(a_0) \neq 0
\end{equation}
```

где:

- f – функция, задающая неявное ОДУ,
- a_0 – точка приложения ростка,
- p – производная dy/dx .

Ссылка:

Страница 9 --> Определение 3

Листинг 6. Ответ модели на промпт 2 для основного результата 3 из аннотации (см. листинг 2): Фрагмент текста и основные формулы.

3. Обобщение результата для семейств уравнений

Фрагмент текста:

"На обобщении этого результата для семейств уравнений основана наша классификация."

Математические формулы:

```
\begin{equation}
F(x, y, p, \varepsilon) = 0, \quad \text{где } F(A_0) = \partial_p F(A_0) = 0
\text{ и } \partial_p^2 F(A_0) \neq 0
\end{equation}
```

где:

- F – функция, задающая семейство неявных ОДУ,
- A_0 – точка приложения ростка,
- ε – параметр семейства.

Ссылка:

Страница 12 --> Теорема 4

Листинг 7. Ответ модели на промпт 2 для основного результата 4 из аннотации (см. листинг 2): Фрагмент текста и основные формулы.

4. Применение классификации к уравнениям смешанного типа

Фрагмент текста:

"В качестве ее приложения получена формальная классификация типичных локальных перестроек на плоскости линейного уравнения смешанного типа с частными производными второго порядка в точках, где области эллиптичности и гиперболичности испытывают морсовские перестройки."

Математические формулы:

```
\begin{equation}
\alpha(x, y, \varepsilon)u_{xx} + 2\beta(x, y, \varepsilon)u_{xy} + \gamma(x, y,
\varepsilon)u_{yy} = \sigma(x, y, \varepsilon, u, u_x, u_y)
\end{equation}
```


$\end{equation}$

где:

- α , β , γ – коэффициенты уравнения,
- ϵ – параметр,
- u_{xx} , u_{xy} , u_{yy} – частные производные функции u .

Ссылка:

Страница 16 --> Теорема 5

Анализ ответов (листинги 4–7) показывает, что модель DeepSeek корректно выделяет фрагменты текста и основные формулы по каждому результату из аннотации. LLM также корректно представляет формулы в формате LaTeX и для каждой формулы указывает ссылку на страницу и логическую единицу, в которой дана формула.

3. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И ФОРМУЛ

На данных тестовой коллекции из 50 статей была проведена оценка эффективности извлечения основных результатов и формул с помощью модели DeepSeek. Сравнивалось количество извлеченных основных результатов и формул статей на основе экспертной оценки и средствами модели DeepSeek по метрикам точности, полноты и F-меры. Результаты приведены на рис. 3 и табл. 1.

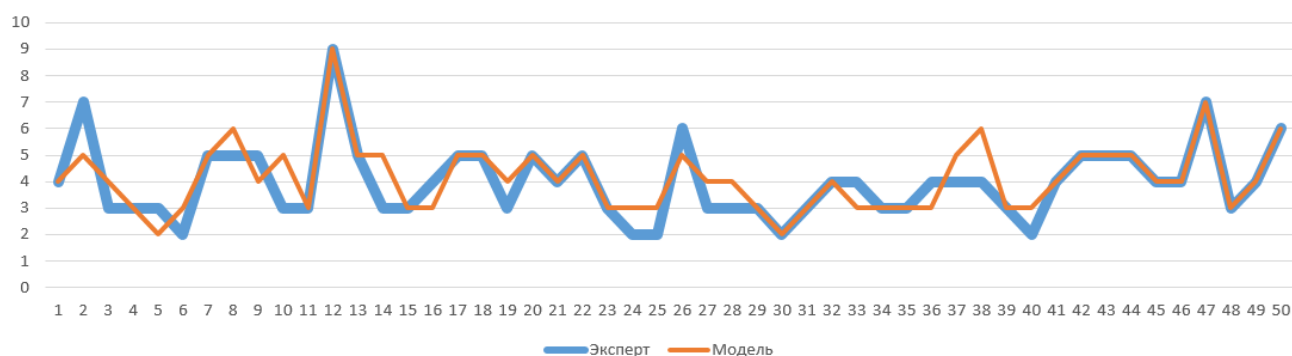


Рис. 3. Количество выделенных основных результатов.

На рис. 3 представлены данные о количестве выделенных основных результатов экспертом и моделью. На оси абсцисс отложены порядковые номера статей, отобранных для исследования, на оси ординат количество выделенных результатов. Синей линией на графике показано количество результатов, выде-

ленных экспертом, оранжевой линией – количество результатов, выделенных моделью. Из рисунка видно, что на некоторых интервалах количества результатов, выделенных моделью и экспертом, совпадают, например самый длинный интервал совпадения от 41 до 50 по оси абсцисс.

Точность P рассчитывается по следующей формуле:

$$P = \frac{N_c}{N_m},$$

где N_c – количество результатов, выделенных моделью и совпадающих с результатами, выделенными экспертом; N_m – количество результатов, выделенных моделью.

Полнота R рассчитана по формуле

$$R = \frac{N_c}{N_e},$$

где N_e – количество результатов, выделенных экспертом.

Для подсчета F-меры используется формула:

$$F = 2 \frac{P * R}{P + R}.$$

Табл. 1. Оценка выделения основных результатов.

	Точность (сред)	Точность (max)	Точность (min)	Полнота (сред)	Полнота (max)	Полнота (min)	F-мера (сред)
Датасет из 50 статей	0.9233	1	0.6	0.9653	1	0.6667	0.9346

В табл. 1 представлена оценка выделения основных результатов. Наихудшее значение точности, равное 0.6, было получено для статьи с номером 10 [22]. Например, в этой статье эксперт выделил следующие результаты:

- построение дифференциальных уравнений равновесия в перемещениях;
- разработка биквадратичных физических зависимостей;
- анализ шести основных случаев физических зависимостей.

Модель смогла выделить лишь следующие результаты:

- построение дифференциальных уравнений равновесия в перемещениях;

- биквадратичная аппроксимация замыкающих уравнений;
- разработка биквадратичных физических зависимостей;
- предположение о независимости диаграмм объемного и сдвигового деформирования в общем случае;
- анализ шести основных случаев физических зависимостей.

Результаты «Биквадратичная аппроксимация замыкающих уравнений» и «Предположение о независимости диаграмм объемного и сдвигового деформирования в общем случае», дополнительно выделенные моделью, снижают значение точности на 0.4.

При выделении моделью дополнительных результатов требуется повторная экспертиза для принятия окончательного решения: относятся ли данные результаты к основным результатам научной статьи или нет.

Если модель выделяет меньше результатов, чем эксперт, то возможно, что такие результаты могут не относиться к основным. В этом случае точность понижается, но также требуется повторная экспертиза для принятия окончательного решения. Однако в настоящем исследовании такая ситуация не встретилась.

Наихудшее значение полноты, равное 0.67, было получено для статьи под номером 5 [23]. Например, в этой статье эксперт выделил следующие результаты:

- обзор недавних результатов в области нелинейных интегродифференциальных уравнений типа свертки;
- обзор недавних результатов в области сингулярных интегродифференциальных уравнений с ядрами Гильберта и Коши;
- для суммируемых решений произвольного знака применен метод максимальных монотонных операторов (по Браудеру – Минти).

Модель выделила только следующие результаты:

- обзор недавних результатов в области сингулярных интегродифференциальных уравнений с ядрами Гильберта и Коши;
- для суммируемых решений произвольного знака применен метод максимальных монотонных операторов (по Браудеру – Минти).

Модели не удалось выделить важный результат научной работы «Обзор недавних результатов в области нелинейных интегро-дифференциальных уравнений типа свертки», что понизило значение полноты на 0.33.

Основной результат, не выделенный моделью, также требует повторной экспертизы для принятия окончательного решения.

Наихудшее значение F-меры, равное 0.75, на графике было получено для статьи под номером 10.

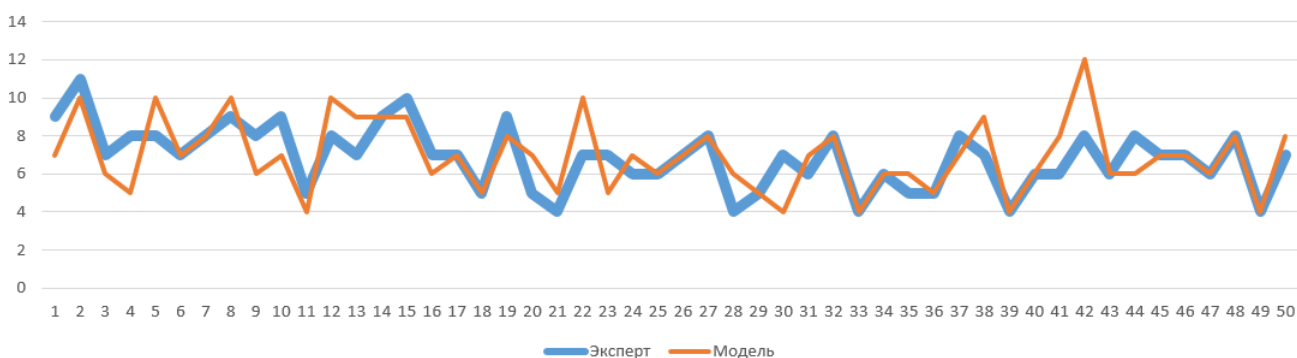


Рис. 4. Количество выделенных основных формул.

На рис. 4 представлены результаты по количеству основных формул, выделенных экспертом и моделью. На оси абсцисс отложены порядковые номера статей, отобранных для исследования, на оси ординат количество выделенных формул. Синей линией на графике обозначено количество формул, выделенных экспертом, оранжевой линией на графике количество формул, выделенных моделью. Из рисунка видно, что на некоторых интервалах количества формул, выделенных моделью и экспертом, совпадают, например самый длинный интервал совпадения от 45 до 49 по оси абсцисс.

Точность P определяется по формуле

$$P = \frac{N_c}{N_m},$$

где N_c – количество формул, выделенных моделью и совпадающих с формулами, выделенными экспертом; N_m – количество формул, выделенных моделью.

Полнота R устанавливается по формуле

$$R = \frac{N_c}{N_e},$$

где N_e – количество формул, выделенных экспертом.

Для подсчета F-меры используется формула

$$F = 2 \frac{P * R}{P + R}.$$

Табл. 2. Оценка выделения основных формул.

	Точность (сред)	Точность (max)	Точность (min)	Полнота (сред)	Полнота (max)	Полнота (min)	F-мера (сред)
Датасет из 50 статей	0.9355	1	0.6667	0.9411	1	0.5714	0.9294

В табл. 2 представлена оценка выделения основных формул. Наихудшее значение точности, равное 0.67, было получено для статьи под номером 28 [24]. Например, в этой статье эксперт выделил следующие формулы:

- основное функционально-дифференциальное уравнение

$$\dot{x}(g(t)) = f(t, x(h(t))), \quad t \in [0, 1];$$

- интегральное представление задачи Коши

$$y(g(t)) = f\left(t, \alpha + \int_0^1 \chi_{[0, h(t)](s)} y(s) ds\right), \quad t \in [0, 1];$$

- пример уравнений с оценкой решения (2 формулы)

$$\dot{x}(t^2) = \frac{x^2(t)}{t^2} + \frac{\lambda}{\sqrt{t}}, \quad t \in [0, 1];$$

$$\frac{k}{2t} \geq \frac{k^2}{t} + \frac{\lambda}{\sqrt{t}}.$$

Модель выделила следующие формулы:

- основное функционально-дифференциальное уравнение

$$\dot{x}(g(t)) = f(t, x(h(t))), \quad t \in [0, 1],$$

- интегральное представление задачи Коши

$$y(g(t)) = f\left(t, \alpha + \int_0^1 \chi_{[0, h(t)](s)} y(s) ds\right), \quad t \in [0, 1];$$

- условие для функций-барьеров

$$\dot{V}(g(t)) \geq f(t, v(h(t))), \quad \dot{w}(g(t)) \leq f(t, w(h(t)));$$

- пример уравнений с оценкой решения (2 формулы)

$$\dot{x}(t^2) = \frac{x^2(t)}{t^2} + \frac{\lambda}{\sqrt{t}}, t \in [0,1];$$

$$\frac{k}{2t} \geq \frac{k^2}{t} + \frac{\lambda}{\sqrt{t}};$$

Операторное уравнение

$$(\psi y)(t) := y(g(t)), \quad (\varphi y)(t) := f\left(t, \alpha + \int_0^1 \chi_{[0, h(t)]}(s) y(s) ds\right).$$

Дополнительно выделенные моделью формулы «Условие для функций-барьеров» и «Операторное уравнение» дают снижение значения точности на 0.33.

Дополнительно выделенные формулы требуют повторной экспертизы для принятия окончательного решения: относятся ли данные формулы к основным формулам научной статьи или нет.

Если модель выделила основных формул меньше, чем эксперт, то точность уменьшается, однако в настоящем исследовании модель выделяла основных формул больше, чем было определено экспертом.

Наихудшее значение полноты, равное 0.57, было получено для статьи под номером 4 [25]. Например, в этой статье эксперт выделил следующие основные формулы:

- интегро-дифференциальные уравнения Вольтера (2 формулы)

$$g(t, \phi) = \int_{-t}^0 K(t, s) h((P_0 \phi)(s)) ds, \quad x'(t) = \int_0^t k(t, s) h(x(s)) ds;$$

- уравнение дискретного запаздывания

$$x'(t) = ax(\lambda t) + bx(t);$$

- пространство Фреше непрерывных отображений

$$C = C((-\infty, 0], R^n);$$

- вариационное уравнение;

$$\begin{aligned} (D \Sigma_t(\varphi) \hat{\varphi})(s) &= \hat{\varphi}(t+s), & \text{если } t+s \leq 0, \\ (D \Sigma_t(\varphi) \hat{\varphi})(s) &= (D \Sigma_{t+s}(\varphi) \hat{\varphi})(0), & \text{если } 0 \leq t+s; \end{aligned}$$

- полупоток для автономных уравнений с запаздыванием

$$\Sigma(t, \phi) = x_t^\phi ;$$

- непрерывный процесс для неавтономных уравнений (2 формулы)

$$x'(t) = g(t, x_t), \quad P(t, t_0, \phi) = p_n \Sigma_g(t - t_0, t_{0*}, \phi).$$

Модель смогла выделить следующие формулы:

- интегро-дифференциальные уравнения Вольтера (2 формулы)

$$g(t, \phi) = \int_{-t}^0 K(t, s) h((P_0 \phi)(s)) ds, \quad x'(t) = \int_0^t k(t, s) h(x(s)) ds ;$$

- полупоток для автономных уравнений с запаздыванием

$$\Sigma(t, \phi) = x_t^\phi ;$$

- непрерывный процесс для неавтономных уравнений (2 формулы)

$$x'(t) = g(t, x_t), \quad P(t, t_0, \phi) = p_n \Sigma_g(t - t_0, t_{0*}, \phi).$$

Модели не удалось выделить следующие важные формулы этой научной статьи: «Уравнение дискретного запаздывания», «пространство Фреше непрерывных отображений» и «Вариационное уравнение», что понизило значение полноты на 0.4.

Основные формулы, не выделенные моделью, требуют повторной экспертизы для принятия окончательного решения: относятся ли эти формулы к основным формулам научной статьи или нет.

Наихудшее значение F-меры, равное 0.73, было получено для статьи под номером 30.

Таким образом, согласно полученным результатам заключаем, что модель DeepSeek выдает релевантные ответы по главным результатам статей и связанным с ними формулам. Метрики точности, полноты и F-меры являются достаточно высокими, средние оценки F-меры по коллекции для основных результатов и связанных с ними формул равны 0.93459 и 0.9294 соответственно.

4. КОНЦЕПЦИЯ БАЗЫ ДАННЫХ

Основные результаты и формулы, выделенные из коллекции статей, сохраняются в базе данных. Предложена следующая структура базы данных, со-

держащая таблицы статей, основных результатов, фрагментов текста основных результатов, формул и переменных формул:

- статья (атрибуты: номер (int), название (varchar (500)) авторы (varchar (500)), год издания (year), наименование журнала (varchar (500)), УДК (varchar (50)), аннотация(text));
- результат (атрибуты: id (int), номер статьи (int), номер результата (int) наименование (varchar (500)), фрагмент текста (text), концепт (varchar(255)));
- формула (атрибуты: id (int), номер статьи (int), номер результата (int), номер формулы (int), наименование (varchar (500)), latex формула(text), описание переменных (text), концепт(varchar (255))).

Связи таблиц в базе данных задаются следующим образом:

- статья содержит один или множество результатов. Результат может быть отнесен только к одной статье;
- результат содержит одну или множество формул. Формула может быть отнесена только к одному результату.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен подход к выделению основных формул с применением современных больших языковых моделей. С помощью модели DeepSeek были проведены эксперименты по установлению основных результатов научных статей на основе аннотаций с последующей локализацией результатов в тексте статьи. В выделенных фрагментах из основного текста статей были извлечены и основные формулы, описывающие эти результаты.

Для оценки релевантности ответов LLM использованы метрики точности, полноты и F-меры. Результаты исследования показывают, что современные языковые модели, подобные DeepSeek, успешно справляются с поставленными задачами. Так, средние значения F-меры по тестовой коллекции равны соответственно 0.93459 для оценки эффективности извлечения основных результатов и 0.9294 для оценки эффективности извлечения основных формул.

Сформированная база данных аннотированных основных формул математических статей является новым математическим артефактом, который может быть встроен в систему математического поиска по коллекции научных ста-

тей. Предполагается, что данный поисковик будет составной частью исследовательской инфраструктуры в области математики, которая разрабатывается в проекте Казанского федерального университета.

Благодарности

Работа выполнена за счет предоставленного в 2026 году Фондом науки и технологий Республики Татарстан гранта на осуществление фундаментальных и поисковых исследований в научных и образовательных организациях, предприятиях и организациях реального сектора экономики Республики Татарстан (соглашение № 2 от 05.08.2026).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Невзорова О.А., Николаев К.С. Семантическое аннотирование математических формул в PDF-документах // Электронные библиотеки. 2022. Т. 25 (6). С. 616–639. <https://doi.org/10.26907/1562-5419-2022-25-6-616-639>
2. Невзорова О.А., Липачев Е.К., Николаев К.С. Семантические сервисы цифровой экосистемы OntoMath для математического образования // Электронные библиотеки. 2023. Т. 26, № 4. С. 538–564. <https://doi.org/10.26907/1562-5419-2023-26-4-538-569>
3. Nikolaev K., Nevzorova O. Annotation of mathematical formulas in pdf documents // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ–2023): сборник трудов по материалам IX Международной конференции и молодежной школы (г. Самара, 17–23 апреля 2023 г.): в 6 томах. – Том 5. Науки о данных. Самара: Издательство Самарского университета, 2023. С. 54–55.
4. Николаев К.С. Сервис семантического поиска формул по коллекции математических PDF-документов // Информационные технологии и вычислительные системы. 2025. № 3. С. 34–43.
5. Ohashi S. et al. Efficient algorithm for math formula semantic search // IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems. 2016. Vol. 99, No. 4. P. 979–988. <https://doi.org/10.1587/transinf.2015DAP0023>
6. Dhar S., Roy S., Das S.K. A critical survey of mathematical search engines // International Conference on Computational Intelligence, Communications, and Business Analytics. Singapore: Springer Singapore, 2018. P. 193–207.

7. *Scharpf P. et al.* Mathematics in Wikidata // In: Proceedings of the 2nd Wikidata Workshop (Wikidata 2021) co-located with the 20th International Semantic Web Conference (ISWC 2021). CEUR Workshop Proceedings. 2021.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.5589640>
8. *Collard J. et al.* Extracting Mathematical Concepts from Text // arXiv. 2022. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2208.13830>
9. *Greiner-Petter A., Youssef A., Ruas T. et al.* Math-word embedding in math search and semantic extraction // Scientometrics 125. 2020. P. 3017–3046.
<https://doi.org/10.1007/s11192-020-03502-9>
10. *Yang M. et al.* A Survey of Information Extraction Based on Deep Learning // School of Management, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China 2022. <https://doi.org/10.3390/app12199691>
11. *Pathak A., Pakray P. et al.* MathIRs: Retrieval System for Scientific Documents // Computación y Sistemas. 2017. Vol. 21, No. 2. P. 253–265.
<https://doi.org/10.13053/CyS-21-2-2743>
12. *Pathak A. et al.* A Formula Embedding Approach to Math Information Retrieval // Computación y Sistemas. 2018. Vol. 22, No. 3. P. 819–833.
<https://doi.org/10.13053/CyS-22-3-3015>
13. *Davila K., Zanibbi R.* Layout and semantics: Combining representations for mathematical formula search // Proceedings of the 40th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval. 2017. P. 1165–1168. <https://doi.org/10.1145/3077136.3080748>
14. *Gipp B. et al.* Methods and Tools to Advance the Retrieval of Mathematical Knowledge from Digital Libraries for Search-, Recommendation-, and Assistance-Systems // arXiv. 2023. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.07335>
15. *Shah A.K., Dey A., Zanibbi R.* A Math Formula Extraction and Evaluation Framework for PDF Documents // Lecture Notes in Computer Science. Vol. 12822. Springer 2021. P. 19–34. https://doi.org/10.1007/978-3-030-86331-9_2
16. *Meadows J. et al.* A Survey in Mathematical Language Processing // arXiv. 2022. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2205.15231>
17. *Gao L. et al.* Pre-trained models for mathematical formula understanding // Proceedings of the 28th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. 2022. P. 3124–3132. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.00377>

18. Schubotz M. et al. Semantification of Identifiers in Mathematics for Better Math Information Retrieval // SIGIR '16: Proceedings of the 39th International ACM SIGIR conference on Research and Development in Information Retrieval. 2016. P. 135–144. <https://doi.org/10.1145/2911451.2911503>
 19. Pankaj D. et al. Embedding and generalization of formula with context in the retrieval of mathematical information // Journal of King Saud University. 2022. P. 6624–6634. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2021.05.014>
 20. Zhu Y. et al. Large Language Models for Information Retrieval: A Survey // Arxiv.org. 2023. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2308.07107>
 21. Богаевский И.А. Неявные обыкновенные дифференциальные уравнения: перестройки и усиление эквивалентности // Известия РАН. Серия математическая. 2014. Т. 78 (6). С. 5–20.
 22. Бакушев С.В. Дифференциальные уравнения равновесия сплошной среды для плоской деформации в декартовых координатах при биквадратичной аппроксимации замыкающих уравнений // Вестн. Томск. гос. ун-та. Матем. и мех. 2022. № 76. С. 70–86.
 23. Асхабов С.Н. Нелинейные интегро-дифференциальные уравнения с разностными ядрами // Итоги науки и техн. Современ. мат. и ее прил. Темат. обз. 2021. Т. 198. С. 22–32
 24. Жуковская Т.В., Филиппова О.В., Шиндяпин А.И. О распространении теоремы Чаплыгина на дифференциальные уравнения нейтрального типа // Вестник российских университетов. Математика. 2019. Т. 24 (127). С. 272–280.
 25. Вальтер Х.-О. Дифференциальные уравнения с запаздыванием с дифференцируемыми операторами решений на открытых областях в $C((-\infty, 0], \mathbb{R}^n)$ и процессы для интегро-дифференциальных уравнений Вольтера // СМФН. 2021. Т. 67 (3). С. 483–506.
-

AN APPROACH TO EXTRACTING BASIC FORMULAS FROM SCIENTIFIC TEXTS BASED ON LARGE LANGUAGE MODELS

E. V. Saitov¹ [0009-0009-1980-8740], O. A. Nevzorova² [0000-0001-8116-9446]

^{1, 2}Kazan (Volga region) Federal University, Kazan, Russia

¹saitoverik@mail.ru, ²onevzoro@gmail.com

Abstract

This article studies the problem of extracting formulas of scientific articles presented in pdf format, as well as converting the selected formulas from pdf to LaTeX format. The extraction of the main formulas of a mathematical article and their subsequent presentation in LaTeX format using the large language model DeepSeek is considered. Extraction of the main results of the papers bases on the paper annotations. Then, using a large language model we search fragments of papers describing the main results and highlighting the main formulas within the found fragments. The solution was evaluated using the metrics of precision, recall, and F-measure; the average values of the F-measure for the test collection was 0.93459 and 0.9294. The MySQL database management system is given as a method for storing the obtained data and the description of the database structure is given in text form: database tables, their attributes, as well as types of stored data

Keywords: *large language model, mathematical article, main formula, main formula, LaTeX format, extraction formula, semantic search, annotation formula, PDF document processing, information retrieval, artificial intelligence, scientometric analysis.*

REFERENCES

1. Nevzorova O.A., Nikolaev K.S. Semanticheskoe annotirovanie matematicheskikh formul v PDF-dokumentah // Russian Digital Library. 2022. Vol. 25 (6). P. 616–639. <https://doi.org/10.26907/1562-5419-2022-25-6-616-639>
2. Nevzorova O.A., Lipachev E.K., Nikolaev K.S. Semanticheskie servisy cifrovoj ekosistemy ontomath dlya matematicheskogo obrazovaniya // Russian Digital Library. 2023. Vol. 26, No. 4. P. 538–564. <https://doi.org/10.26907/1562-5419-2023-26-4-538-569>

3. *Nikolaev K., Nevzorova O.* Annotation of mathematical formulas in pdf documents // *Informacionnye tekhnologii i nanotekhnologii (ITNT-2023): sbornik trudov po materialam IX Mezhdunarodnoj konferencii i molodezhnoj shkoly (g. Samara, 17–23 aprelya 2023 g.): v 6 tomah. – Tom 5. Nauki o dannyh. Samara: Izdatel'stvo Samarskogo universiteta, 2023. S. 54–55.*
4. *Nikolaev K.S.* Servis semanticheskogo poiska formul po kollekcii matematicheskikh PDF-dokumentov // *Informacionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy. 2025. No. 3. S. 34–43.*
5. *Ohashi S. et al.* Efficient algorithm for math formula semantic search // *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems. 2016. Vol. 99, No. 4. P. 979–988. <https://doi.org/10.1587/transinf.2015DAP0023>.*
6. *Dhar S., Roy S., Das S.K.* A critical survey of mathematical search engines // *International Conference on Computational Intelligence, Communications, and Business Analytics. Singapore: Springer Singapore, 2018. P. 193–207.*
7. *Scharpf P. et al.* Mathematics in Wikidata // In: *Proceedings of the 2nd Wikidata Workshop (Wikidata 2021) co-located with the 20th International Semantic Web Conference (ISWC 2021). CEUR Workshop Proceedings. 2021. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5589640>*
8. *Collard J. et al.* Extracting Mathematical Concepts from Text // *arXiv. 2022. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2208.13830>*
9. *Greiner-Petter A., Youssef A., Ruas T. et al.* Math-word embedding in math search and semantic extraction/ *Scientometrics. 2020. Vol. 125. P. 3017–3046. <https://doi.org/10.1007/s11192-020-03502-9>*
10. *Yang M. et al.* A Survey of Information Extraction Based on Deep Learning // *School of Management, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China 2022. <https://doi.org/10.3390/app12199691>*
11. *Pathak A., Pakray P. et al.* MathIRs: Retrieval System for Scientific Documents // *Computación y Sistemas. 2017. Vol. 21, No. 2. P. 253–265. <https://doi.org/10.13053/CyS-21-2-2743>*
12. *Pathak A. et al.* A Formula Embedding Approach to Math Information Retrieval // *Computación y Sistemas. 2018. Vol. 22, No. 3. P. 819–833. <https://doi.org/10.13053/CyS-22-3-3015>*

13. *Davila K., Zanibbi R.* Layout and semantics: Combining representations for mathematical formula search // Proceedings of the 40th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval. 2017. P. 1165–1168. <https://doi.org/10.1145/3077136.3080748>
14. *Gipp B. et al.* Methods and Tools to Advance the Retrieval of Mathematical Knowledge from Digital Libraries for Search-, Recommendation-, and Assistance-Systems // arXiv:2305.07335. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.07335>
15. *Shah A.K., Dey A., Zanibbi R.* A Math Formula Extraction and Evaluation Framework for PDF Documents // Lecture Notes in Computer Science. Vol. 12822. Springer 2021. P. 19–34. https://doi.org/10.1007/978-3-030-86331-9_2
16. *Meadows J. et al.* A Survey in Mathematical Language Processing // arXiv. 2022. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2205.15231>
17. *Gao L. et al.* Pre-trained models for mathematical formula understanding // Proceedings of the 28th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. 2022. P. 3124–3132. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.00377>
18. *Schubotz M. et al.* Semantification of Identifiers in Mathematics for Better Math Information Retrieval // SIGIR'16: Proceedings of the 39th International ACM SIGIR conference on Research and Development in Information Retrieval. 2016. P. 135–144. <https://doi.org/10.1145/2911451.2911503>
19. *Pankaj D. et al.* Embedding and generalization of formula with context in the retrieval of mathematical information // Journal of King Saud University. 2022. P. 6624–6634. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2021.05.014>
20. *Zhu Y. et al.* Large Language Models for Information Retrieval: A Survey // Arxiv.org. 2023. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2308.07107>
21. *Bogaevskij I.A.* Neyavnye obyknovennye differencial'nye uravneniya: perestrojki i usilenie ekvivalentnosti // Izvestiya RAN. Seriya matematicheskaya. 2014. T. 78 (6). S. 5–20.
22. *Bakushev S.V.* Differencial'nye uravneniya ravnovesiya sploshnoj sredy dlya ploskoj deformacii v dekartovyh koordinatah pri bikvadratichnoj approksimacii zamykayushchih uravnenij // Vestn. Tomsk. gos. un-ta. Matem. i mekh. 2022. No. 76. S. 70–86.

23. Askhabov S.N. Nelinejnye integro-differencial'nye uravneniya s raznostnymi yadrami // Itogi nauki i tekhn. Sovrem. mat. i ee pril. Temat. obz. 2021. T. 198. S. 22–32

24. Zhukovskaya T.V., Filippova O.V., Shindyapin A.I. O rasprostranении teoremy CHaplygina na differencial'nye uravneniya nejtral'nogo tipa // Vestnik rossijskih universitetov. Matematika. 2019. T. 24 (127). S. 272–280.

25. Val'ter H.-O. Differencial'nye uravneniya s zapazdyvaniem s differenciruemyimi operatorami reshenij na otkrytyh oblastyah v $C((-\infty, 0], \mathbb{R}^n)$ i processy dlya integrodifferencial'nyh uravnenij Vol'terra // SMFN. 2021. T. 67 (3). S. 483–506.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



САИТОВ Эрик Вадимович – магистрант Института вычислительной математики и информационных технологий Казанского федерального университета.

Erik Vadimovich SAITOV – Master's student at the Institute of Computational Mathematics and Information Technologies, Kazan Federal University.

email: saitoverik@mail.ru

ORCID: 0009-0009-1980-8740



НЕВЗОРОВА Ольга Авенировна — кандидат технических наук, доцент Казанского (Приволжского) федерального университета.

Olga Avenirovna NEVZOROVA — Candidate of Technical Sciences (PhD equivalent), Associate Professor, Kazan (Volga Region) Federal University.

ORCID: 0000-0001-8116-9446.

email: onevzoro@gmail.com

Материал поступил в редакцию 10 апреля 2026 года

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕРАТИВНО-СОСТЯЗАТЕЛЬНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ СИНТЕЗА ИОНОГРАММ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ: ПРОБЛЕМЫ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

А. Н. Сингин¹ [0009-0009-6781-8644], А. О. Щирый² [0000-0001-7312-4424]

¹Национальный исследовательский институт «МЭИ», г. Москва, Россия

²Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н. В. Пушкова РАН, г. Москва, Россия

¹sasha.singin@gmail.com, ²andreyschiriy@gmail.com

Аннотация

Рассмотрены особенности и методика применения генеративно-состязательных нейронных сетей (Generative adversarial networks, GAN) для синтеза ионограмм радиозондирования ионосферы в контексте построения статистической модели ионосферы. Предложена специфика наклонного радиозондирования ионосферы, показаны природа данных и их физический смысл. Данные представляют собой конфигурации сеансов радиозондирования, характеристики среды и ионограммы. Описана методика предобработки исходных данных для формирования обучающего корпуса. Приведена общая организация условных GAN, используемых в задачах генерации изображений. Рассмотрены ключевые модификации этого устройства применительно к синтезу ионограмм и схематично продемонстрирована архитектура. Выделены особенности выбора функции потерь, обусловленные знаниями о физическом смысле ионограммы. Как следствие, сформирована составная функция потерь, сочетающая ответ дискриминатора и эвристику. Приведены примеры полученных результатов. Обсуждены проблемы текущей реализации и поставлены задачи дальнейших исследований.

Ключевые слова: ионосфера, радиозондирование, ионограммы, генеративно-состязательные сети, синтез научных изображений.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования ионосферы востребованы как для фундаментальной науки (для построения и уточнения моделей геофизических процессов), так и для прикладных целей [1–15]. По данным радиозондирования ионосферы коротковолновыми сигналами (КВ) можно получить информацию о процессах в ионосферной плазме, ее структуре и состоянии. Эти данные также крайне важны для систем КВ-радиосвязи, радиолокации и радионавигации, для компенсации искажений, вносимых ионосферной средой распространения КВ. В частности, работа таких радиотехнических систем (РТС) КВ-диапазона, как системы дальней КВ-радиосвязи и загоризонтной радиолокации, основана на способности КВ многократно отражаться от ионосферы и земной поверхности. Ключевой задачей для обеспечения корректного функционирования таких РТС является адаптация к ионосферным условиям. При этом возможна адаптация РТС КВ-диапазона по рабочей частоте, мощности излучения и скорости передачи информации. Перспективные методы адаптации предполагают даже измерение и компенсацию передаточной функции КВ-радиолинии [9]. Информация об ионосферных процессах важна также для корректного функционирования систем глобального позиционирования (GPS, ГЛОНАСС), хотя эти системы работают не в КВ-диапазоне, но ионосфера является поглощающей средой для радиоволн их рабочих диапазонов, и учет данных об ионосферном поглощении критически значим для функционирования таких систем, в частности для обеспечения требуемой точности определения координат.

Для адаптации к ионосферным условиям необходимо производить оперативную диагностику ионосферы. Из методов такой диагностики наибольший интерес представляют вертикальное, наклонное и возвратно-наклонное радиозондирования ионосферы (соответственно ВЗИ, НЗИ, ВНЗИ) [1, 2]. ИONOграмма ВЗИ представляет собой зависимость амплитуды радиосигнала от частоты и высоты отражения, иONOграмма НЗИ – зависимость амплитуды радиосигнала от частоты и времени группового запаздывания радиоволны.

В то же время актуальной является задача синтеза искусственных иONOграмм для решения ряда задач (интерпретации экспериментальных иONOграмм, определения факта аномальности состояния ионосферы и др.). Традиционно синтез строится на решении краевой задачи распространения радиоволн в двумерно-неоднородной ионосфере [3–8]. Подобный подход позволяет получать

«схематичные» ионограммы «классического» вида, что может быть релевантно, например, для случаев невозмущенной ионосферы. Однако из-за отсутствия полной и точной модели ионосферы математическое моделирование ее реального состояния для всего многообразия моментов времени не представляется возможным (особенно в приполярных областях).

Искусственные нейронные сети (ИНС) открывают альтернативный подход к моделированию состояния ионосферы. Они позволяют получить статистическую модель ионосферы, представленную обученной ИНС. Имеющиеся ионограммы наклонного радиозондирования содержат информацию о фактическом состоянии ионосферы на конкретной радиотрассе в момент времени. Условия проведения зондирования и прочие метаданные, от которых зависит изображение на ионограмме, известны. В таком случае ИНС можно научить синтезировать точные копии ионограмм. При наличии этой способности ИНС становится локальной во времени и пространстве моделью ионосферы, что создает потенциал для применения с целью уточнения существующих математических моделей и генерации синтетических данных для других задач.

КОРПУС ДАННЫХ

В качестве основного источника данных выступает архив ионограмм наклонного радиозондирования Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН (ИЗМИ РАН). Из него была отобрана непрерывная серия ионограмм Кипр–Троицк за год между июлем 2024 и 2025 гг. Временной интервал между сеансами радиозондирования составлял 5 мин.

Сами данные представлены в специальном формате [12] и включают метаданные сеанса, массив пикселей ионограммы (рис. 1) и его свойства. Метаданные содержат конфигурацию передатчика и приемника, их координаты, время измерения, начальную и конечную частоты зондирования, интервалы времени группового запаздывания и прочие параметры. Ионограммы как изображения монохромны, имеют переменную геометрию, обусловленную конфигурацией сеанса, а также содержат помехи различной природы.

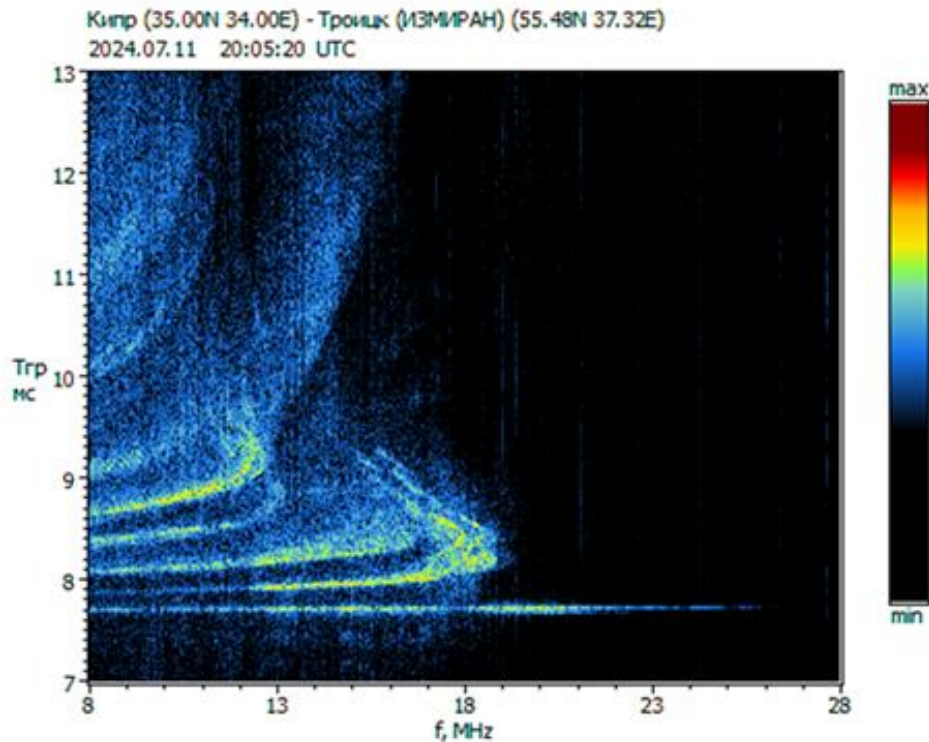


Рис. 1. Ионограмма наклонного радиозондирования ионосферы.

Для полноценного моделирования состояния ионосферы необходимо знать характеристики и самой среды, и внешних факторов, влияющих на состояние ионосферы. Очевидна важность учета солнечных и геомагнитных индексов, а также характеристик межпланетного магнитного поля, параметров плазмы солнечного ветра [14, 15]. Для получения этих данных был использован сервис NASA/GSFC's OMNIWeb [16]. Они были добавлены в обучающую выборку к соответствующим (по дате-времени) ионограммам.

В контексте задачи синтеза научных изображений с помощью нейронных сетей физические параметры выступают в роли условия, которое представляет собой вектор их нормированных величин. Нормированию предшествовала обработка данных, которая включала в себя исключение из выборки элементов с неполными данными состояния околоземного космического пространства. Помимо этого, исключались наблюдения, в которых эти величины принимали статистически аномальные значения. Критерий аномальности заключался в попадании в диапазон ± 2 сигма. Этот шаг является спорным с точки зрения построения локальной вычислительной модели ионосферы. Ключевым аргументом стало ограничение по вычислительным ресурсам, из-за которого обучающую вы-

борку уменьшили до 50 тыс объектов. При таких обстоятельствах мера по исключению концов распределения не является нарушением. Сужение оставшейся выборки проведено случайным образом. Нормирование выполнено относительно диапазонов $[0, 1]$ и $[-1, 1]$. Этот процесс является устоявшейся практикой в глубоком обучении, поскольку решает ряд ключевых проблем обучения нейронной сети: доминирования признаков, медленной сходимости, нестабильного обучения и не взрыва градиентов из-за несоответствия функции активации [17]. К первому диапазону приведены величины, которые не предполагают наличия отрицательных значений и нулевое значение которых означает отсутствие воздействия. К второму приведены периодики и величины, принимавшие значения по обе стороны от нуля. В зависимости от смысла, который несет параметр, применялись различные методы нормировки. Так, для физических величин зачастую было использовано линейное нормирование на пиковый теоретический максимум, к периодическим величинам (типа дня внутри года и часа внутри дня) применялось синусоидальное, а для остальных величин – минимаксное.

В процессе подготовки набора данных ионограммы были частично очищены от шума. В частности, в них были удалены вертикальные полосы, называемые частотным помехами. Для очистки был применен вертикальный медианный фильтр (к каждому столбцу изображения шириной в 1 пиксель). Основание для этого следует из эвристик о большей яркости полезного сигнала над шумом и численном преобладании шумовых пикселей над целевыми в рамках колонки. Такой метод позволил сильно сократить количество ненужной информации на изображении при минимальных утрате и искажении значимой. Отметим также, что каждая ионограмма сопровождается информацией о пределах частот и времени в привязке к координатной сетке изображения. Это позволяет минимизировать геометрические искажения структурных элементов ионограммы при приведении к стандартным размерам.

АРХИТЕКТУРА GAN

Среди множества существующих моделей генеративных нейронных сетей GAN зарекомендовали себя как оптимальное решение с точки зрения отношения вычислительных ресурсов к качеству результата. Существующий опыт [18] показал, что они могут успешно применяться в задачах синтеза научных изображений. Это следует из возможности осуществлять условную генерацию и работать без математической функции потерь, описывающей качество результата. За

основу была принята архитектура BigGAN [19]. Были использованы неглубокая структура генератора и симметричный дискриминатор для квадратного изображения иконограмм со сторонами из 256 пикселей. Из каждого был удален слой собственного внимания, как вычислительно емкий. Для генератора проецирование условия происходит через механизм SPADE [20], что позволяет условию оказывать различное влияние на сегменты выходного изображения. В дискриминаторе этот процесс осуществляется путем скалярного произведения признаков изображения и вектора-условия с последующим пуллингом суммы.

МЕТОДОЛОГИЯ ОБУЧЕНИЯ И ФУНКЦИЯ ПОТЕРЬ

В контексте обучения GAN существует множество нюансов, связанных с балансом сил дискриминатора и генератора. Для эффективного обучения первый не должен быть существенно сильнее второго. Это проявляется в высокой точности предсказания дискриминатора. Подобная ситуация не позволяет генератору получать полезные знания для корректировки собственных весов и, как следствие, обучиться. Ключевыми факторами, влияющими на процесс обучения ИНС, являются оптимизатор и его параметры, выбранная функция потерь, скорость обучения и правила ее изменения.

Конфигурация оптимизатора в большинстве GAN предполагает использование Adam с $\beta_1 = 0$, $\beta_2 = 0.999$, где значение первого параметра позволяет игнорировать историю накопления градиентов, а высокое значение второго – получать устойчивую оценку их масштабов. Подобное решение обусловлено динамичным характером ландшафта потерь, шумностью градиентов и значительной вариативностью их норм. Подход к подбору скорости обучения отличается от работы BigGAN, где дискриминатор обладает на порядок меньшей скоростью обучения. Подобный подход компенсируется тем, что на один шаг генератора приходится два шага дискриминатора. Нами использована иная методика, где оба участника GAN обладают одинаковой скоростью обучения и равным числом шагов. Это создает риски подавления дискриминатором генератора на ранних этапах, что может нарушить сходимость процесса обучения. Во избежание этих последствий была использована составная функция потерь.

Как правило, при обучении GAN единственным сигналом качества результата для генератора выступает оценка правдоподобности дискриминатора. Это особенно актуально в контексте генерации изображений естественного

мира. Однако в случае с генерацией научных изображений допустимо использование знаний о природе и характере синтезируемого изображения для улучшения сходимости и качества результата. Укажем известные положения, сделанные на основе методики сбора, физического смысла ионограммы и правил ее построения:

- большая в процентном соотношении часть изображения – это шум, часть которого составляют системные помехи;
- форма треков мод;
- в основном полезный сигнал сосредоточен под некоторой диагональю, которая смещается от случая к случаю;
- как правило, полезный сигнал ярче, чем шум.

При синтезе ионограмм наклонного радиозондирования ионосферы не требуется точно воссоздавать изначальное изображение – основной акцент делается на точное предсказание треков мод, их положения и количества, а также распыленного сигнала. Некоторые знания, типа информация о структуре и характере системных помех, позволяют проводить предобработку изображений и убирать незначимую информацию, что дает возможность модели избавиться от затрат ресурсов в виде параметров, нацеленных на предсказание шума. Однако удаление системных помех является недостаточным для четкого отделения на изображении сигнала от шума. Доступным подходом является использование эвристики о большей интенсивности сигнала над шумом. В таком случае для построения разделяющей их маски можно взять квадрат интенсивности. Поскольку у ионограмм она приведена к диапазону от 0 до 1, при возведении в степень малые значения становятся заметно меньше, а потери больших уменьшаются. Путем умножения на некоторый коэффициент масштабирования (принятый нами равным 10) получается маска весов пикселей. Согласно ей вычислялась среднеквадратическая ошибка между интенсивностями эталонной и сгенерированной ионограмм, что позволило значительно ускорить сходимость генератора. Такого уровня достаточно для воспроизведения примерных контуров полезного сигнала и понимания его расположения внутри изображения, также это не позволяет дискриминатору рано «задавить» генератор. Таким образом, составная функция потерь представляет собой среднеквадратичную ошибку, рассчитанную по эвристически обусловленной маске и hinge loss, взятых в отношении 1:3.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПРОБЛЕМЫ

Интерпретация качества результатов является нетривиальным этапом в задаче синтеза ионограмм: основная трудность состоит в отсутствии существующей качественной меры оценки. Метрики, принятые в контексте синтеза изображений и оценивающие пиксельное сходство, приводят к созданию усредненного шума, а метрики, оценивающие структурную схожесть, равнозначно оценивают степени подобия шума и полезного сигнала.

Среди конкретных критериев оценки можно выделить следующие практически значимые: количество явно выделяемых треков мод, соответствие положения и формы трека, положение и форма сигнальной «пыли». Каждый из них, в сочетании с другими, позволяет оценить при генерации влияние некоторой части архитектуры на результат. Таким образом, повторение формы основных треков мод при их смещении может свидетельствовать о недостаточном внимании модели к геометрии выходного изображения. Размытые формы треков при их правильном количестве могут говорить о недостаточно четком указании их границ на выходе. Это, в свою очередь, может указывать на неоптимальность функции потерь. Перечисленные критерии не формализованы математически. Оценку наилучшей модели, как правило, производят путем визуального осмотра результатов генерации для образцов из тестовой выборки. Выполняют сравнительный анализ исходной и сгенерированной ионограмм. В ходе этого процесса устанавливают и фиксируют ключевые отличия, присущие, как правило, всем элементам в рамках проверки. Определение причин и зон улучшения в данном случае производят путем сопоставления проявляемого недостатка со звеном архитектуры.

На рис. 2 представлены типовые ионограммы, включенные в выборку. Каждая из них отличается формой треков мод и распыленного сигнала, их положением и интенсивностью.

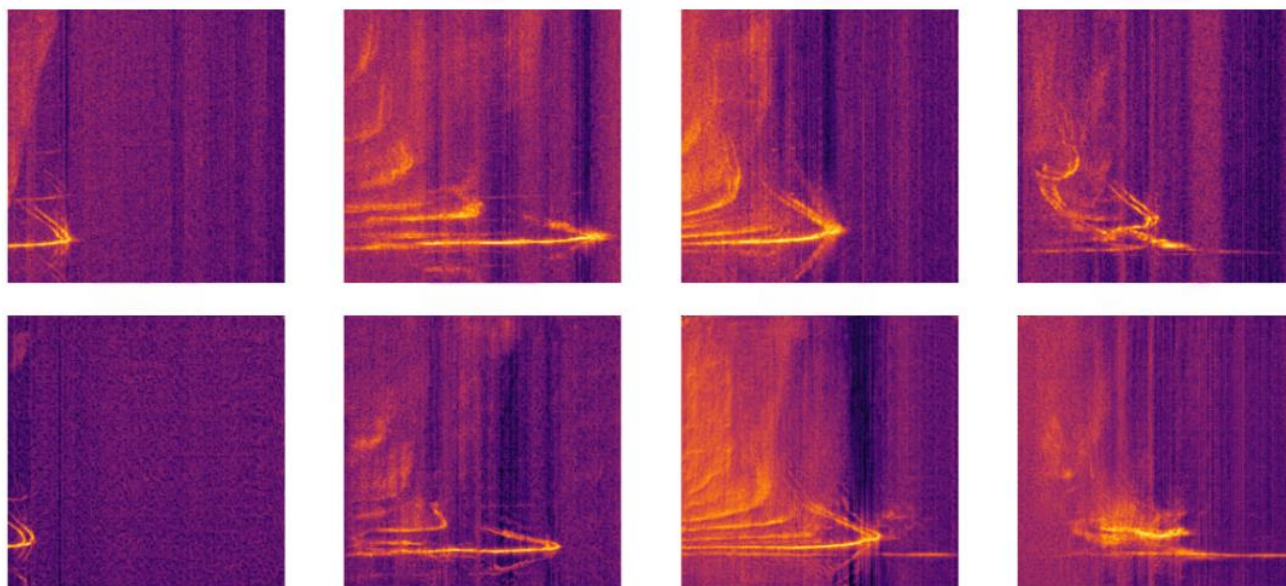


Рис. 2. Истинные (сверху) и сгенерированные (снизу) ионограммы.

На сгенерированных изображениях можно проследить совпадение положений по вертикали между нижними треками мод. При этом по горизонтали наблюдаются различия. Области, в которых сосредоточена основная масса сигнала, пересекаются, но не совпадают. Можно утверждать, что отдаленно сгенерированные изображения кажутся похожими на эталон. Однако на практике отличия критичны в контексте уточнения математических моделей и интерпретации смысла.

Объяснить такое поведение модели можно рядом факторов и причин. К ним, в частности, относится отсутствие точной сегментации изначальной ионограммы на полезный сигнал и шум, что приводит к невозможности сосредоточения модели на важной информации – часть ее ресурсов уходит на предсказание подобного шума. Подозрения также падают на степень выразительности вектора-условия. Отсутствие в нем параметров, описывающих состояние ионосферы в фиксированный момент времени, влияет на полноту знаний модели о среде. Недостаток знаний ведет к неспособности обучить нейронную сеть, соответствующую действительности. Помимо этого, дополнительное внимание стоит уделить интеграции условия, так как из-за недостаточной проекции условия в процесс генерации модель может упустить взаимосвязи на изображении. Все перечисленное может объяснять неточное совпадение положений треков на ионограммах.

Для проведения экспериментов с целью уточнения отмеченных причин необходимо иметь возможность оценить качество генерации. Визуальный осмотр, не будучи заведомо точной и масштабируемой практикой, становится еще более неуместным, как следствие растущего качества генерируемых ионограмм. Ключевыми проблемами, отрицающими визуальную оценку, являются сравнение и обобщение различных составляющих качества синтеза ионограмм. Невозможность визуального подхода не позволяет ответить на вопросы о схожести положения, точности формы и приводит процесс совершенствования модели в тупик. Остро также встает вопрос о применении качественной оценки. Доступным подходом может быть обучение сверточной нейронной сети, где входом и выходом были бы ионограммы. Подобная модель содержит в себе низкоуровневые репрезентации, характеризующие каждую ионограмму. Сравнение векторов-представлений изображений является устоявшейся практикой в контексте глубокого обучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построение локальной модели ионосферы путем создания нейронной сети для синтеза ионограмм наклонного радиозондирования ионосферы возможно – предварительные результаты позволяют это утверждать. Названный подход требует использования качественной оценки схожести между сгенерированной и эталонной ионограммами. Для повышения качества синтеза требуется сегментация полезного сигнала на ионограммах. Также модель может выиграть от большего объема информации в векторе условия и усиления степени его влияния на процесс генерации.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИЗМИРАН (тема № FFUM-2026-0010).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радиозондирование ионосферы спутниковыми и наземными ионозондами / Под ред. С.И. Авдюшина. Труды Института прикладной геофизики им. академика Е.К. Федорова. М.: ИПГ, 2008.

URL: <http://ipg.geospace.ru/publications/book-2008.pdf>

2. Акимов В.Ф., Калинин Ю.К. Введение в проектирование ионосферных загоризонтных радиолокаторов. М.: Техносфера, 2017. 492 с.
3. Носиков И.А., Падохин А.М., Крашенинников И.В., Клименко М.В., Бессараб П.Ф. Особенности расчета минимальных частот мод в задаче прогнозирования условий ионосферной радиосвязи // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2021. Т. 64, № 8-9. С. 672–685.
4. Прогнозирование состояния КВ-радиоканала на протяженных трассах путем математического моделирования ионограмм НЗ: Отчет о НИР. Часть I / Мособлсовет ВОИР; рук. Ю.Н. Черкашин, И.В. Крашенинников. М., 1990. 27 с.
5. Программы расчета траекторных характеристик распространения коротких радиоволн: Сборник / АН СССР, Ин-т земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн; Отв. ред. канд. физ.-мат. наук Е.М. Жулина. М.: ИЗМИ РАН, 1975. 58 с.
6. Chen J., Bennett J.A., Dyson P.L. Synthesis of oblique ionograms from vertical ionograms using quasi-parabolic segment models of the ionosphere // Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. 1992. Vol. 54, Issues 3–4. P. 323–331.
7. Ларюнин О.А. Численный синтез ионограмм в горизонтально-неоднородной ионосфере на основе модели комбинированного параболического слоя // Солнечно-земная физика. 2016. №. 3. С. 52–58.
<https://doi.org/10.12737/18656>
8. Settini A., Pezzopane M., Pietrella M., Bianchi C., Scotto C., Zuccheretti E., Makris J. Testing the IONORT-ISP system: A comparison between synthesized and measured oblique ionograms // Radio Science, March 2013. Vol. 48, No. 2. P. 167–179. <https://doi.org/10.1002/rds.20018>
9. Shiriy A.O. HF channel transmit function module measurement // Proceedings of the 5th International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2002. 2002. Vol. 5. P. 365–369.
<https://doi.org/10.1109/apede.2002.10449645>
10. Щирый А.О. Разработка и моделирование алгоритмов автоматического измерения характеристик ионосферных коротковолновых радиолиний: Автореф. ... канд. техн. наук: Санкт-Петербургский гос. ун-т телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. СПб., 2007. 19 с. EDN: QMISDO
11. Щирый А.О. Архитектура программной части аппаратно-программного комплекса дистанционного наземного радиозондирования ионосферы //

Новые информационные технологии в автоматизированных системах. 2015. №18. С. 144–152.

12. Щирый А.О. Алгоритмы и программное обеспечение автоматизации процессов измерений и обработки данных оперативной диагностики ионосферы и ионосферных радиолиний // Журнал радиоэлектроники. 2022. №10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.10.4>

13. Щирый А.О. Использование нейронных сетей для дальнейшего развития программной части аппаратно-программных комплексов радиозондирования ионосферы // Электромагнитные волны и электронные системы. 2024, Т. 29. № 5. С. 55–60. <https://doi.org/10.18127/j15604128-202405-08>

14. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы / Отв. ред. Г.С. Иванов-Холодный, М.И. Пудовкин; АН СССР, Ин-т земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн. М.: Наука, 1988. 526 с.

15. Tsaouri I., Themens D. R., Belehaki A. et al. Ionosphere variability II: Advances in theory and modeling // Advances in Space Research. 2023. Vol. 72, No. 3. P. 567–611. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.07.056>

16. Goddard Space Flight Center (GSFC). Space Physics Data Facility (SPDF). OMNIWeb Service – NASA. URL: https://omniweb.gsfc.nasa.gov/html/ow_data.html

17. Sola J.V., Sevilla J. Importance of input data normalization for the application of neural networks to complex industrial problems // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1997. Vol. 44, No. 3. P. 1464–1468. <https://doi.org/10.1109/23.589532>

18. Oliveira L. de, Paganini M., Nachman B. Learning Particle Physics by Example: Location-Aware Generative Adversarial Networks for Physics Synthesis // Comput. Softw. Big. Sci. 2017. 1. 4.

19. Brock J. Donahue, Simonyan K. Large scale GAN training for high fidelity natural image synthesis. URL: <https://arxiv.org/abs/1809.1109>

20. Park T., Liu M.-Y., Wang T.-C., Zhu J.-Y. Semantic Image Synthesis with Spatially-Adaptive Normalization. URL: <https://arxiv.org/abs/1903.07291>

GENERATIVE ADVERSARIAL NETWORKS FOR THE SYNTHESIS OF IONOSPHERIC RADIO SOUNDING IONOGRAMS: CHALLENGES AND PRELIMINARY RESULTS

A. N. Singin¹ [0009-0009-6781-8644], A. O. Schiriy² [0000-0001-7312-4424]

¹National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia

²Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

¹sasha.singin@gmail.com, ²andreyschiriy@gmail.com

Abstract

The process of applying Generative Adversarial Networks (GANs) for the synthesis of ionospheric sounding ionograms is considered. This task is relevant in the context of constructing a statistical model of the ionosphere through empirical search. This paper describes the specifics of oblique ionospheric sounding as a subject area, particularly outlining the origin of the data and its physical meaning. The dataset, which includes radio sounding session configurations, environmental parameters, and ionograms, is presented and characterized. A method for converting and preprocessing raw data to form a training corpus is described.

The paper presents the general organization of conditional GANs used in image generation tasks, discusses key modifications to their structure specifically for ionogram synthesis, and provides a schematic demonstration of the architecture. Furthermore, the specifics of loss function selection, based on knowledge of the physical meaning of ionograms, are identified. Based on these considerations, a composite loss function is formulated, combining the discriminator's response with heuristics. Finally, the work provides examples of the results obtained, formulates key existing implementation challenges, and proposes potential solutions.

Keywords: *ionosphere, radio sounding, ionograms, generative adversarial networks, scientific image synthesis*

REFERENCES

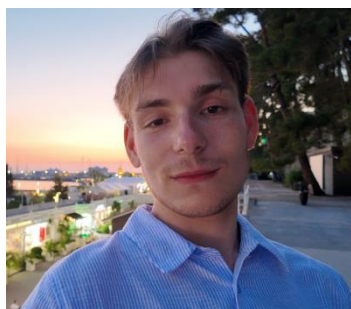
1. Radiozondirovanie ionosfery sputnikovymi i nazemnymi iono-zondami / Pod red. S.I. Avdyushina. Trudy instituta prikladnoj geofiziki im. akademika E.K. Fedorova. M.: IPG, 2008.

URL: <http://ipg.geospace.ru/publications/book-2008.pdf>

2. Akimov V.F., Kalinin Yu.K. Vvedenie v proektirovanie ionosfernyh zagorizontnyh radiolokatorov. M.: Tekhnosfera, 2017. 492 s.
3. Nosikov I.A., Padohin A.M., Krasheninnikov I.V., Klimenko M.V., Bessarab P.F. Osobennosti raschyota minimal'nyh chastot mod v zadache prognozirovaniya uslovij ionosfernoj radiosvyazi // Izvestiya vysshih uchebnyh za-vedenij. Radiofizika. 2021. T. 64, № 8-9. S. 672–685.
4. Prognozirovanie sostoyaniya KV-radiokanala na protyazhennyh tras-sah putem matematicheskogo modelirovaniya ionogramm NZ: Otchet o NIR. Chast' I / Mosoblsovets VOIR; ruk. Yu.N. Cherkashin, I.V. Krasheninnikov. M., 1990. 27 s.
5. Programmy rascheta traektornyh harakteristik rasprostraneniya korotkih radiovoln: Sbornik / AN SSSR, In-t zemnogo magnetizma, ionosfery i rasprostraneniya radiovoln; Otv. red. kand. fiz.-mat. nauk E.M. Zhulina. M.: IZMI RAN, 1975. 58 s.
6. Chen J., Bennett J.A., Dyson P.L. Synthesis of oblique ionograms from vertical ionograms using quasi-parabolic segment models of the ionosphere // Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. 1992. Vol. 54, Issues 3–4. P. 323–331.
7. Laryunin O.A. Chislennyj sintez ionogramm v gorizontal'no-neodnorodnoj ionosfere na osnove modeli kombinirovannogo parabolicheskogo sloya // Solnechno-zemnaya fizika. 2016. №. 3. S. 52–58.
<https://doi.org/10.12737/18656>
8. Settimi A., Pezzopane M., Pietrella M., Bianchi C., Scotto C., Zuccheretti E., Makris J. Testing the IONORT-ISP system: A comparison between synthesized and measured oblique ionograms // Radio Science, March 2013. Vol. 48, No. 2. P. 167–179. <https://doi.org/10.1002/rds.20018>
9. Shiriy A.O. HF channel transmit function module measurement // Proceedings of the 5th International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2002. 2002. Vol. 5. P. 365–369.
<https://doi.org/10.1109/apede.2002.10449645>
10. Shiriy A.O. Razrabotka i modelirovanie algoritmov avtomaticheskogo izmereniya harakteristik ionosfernyh korotkovolnovykh radiolinij: Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: Sankt-Peterburgskij gos. un-t telekommunikacij im. prof. M.A. Bonch-Bruевичa. SPb., 2007. 19 c. EDN: QMISDO

11. *Shiriy A.O.* Arhitektura programnoj chasti apparatno-programmnogo kompleksa distancionnogo nazemnogo radiozondirovaniya ionosfery // *Novye informacionnye tekhnologii v avtomatizirovannyh si-stemah*. 2015. № 18. S. 144–152.
12. *Shiriy A.O.* Algoritmy i programnoe obespechenie avtomatizacii processov izmerenij i obrabotki dannyh operativnoj diagnostiki ionosfery i ionosfernyh radiolinij // *Zhurnal radioelektroniki*. 2022. №10.
<https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.10.4>
13. *Shiriy A.O.* Ispol'zovanie nejronnyh setej dlya dal'nejshego razvitiya programnoj chasti apparatno-programmnyh kompleksov radiozondirovaniya ionosfery // *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy*. 2024, T. 29. № 5. S. 55–60.
<https://doi.org/10.18127/j15604128-202405-08>
14. *Bryunelli B.E., Namgaladze A.A.* Fizika ionosfery / Otv. red. G.S. Ivanov-Holodnyj, M.I. Pudovkin; AN SSSR, In-t zemnogo magnetizma, ionosfery i rasprostraneniya radiovoln. M.: Nauka, 1988. 526 s.
15. *Tsagouri I., Themens D. R., Belehaki A. et al.* Ionosphere variability II: Advances in theory and modeling // *Advances in Space Research*. 2023. Vol. 72, No. 3. P. 567–611. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.07.056>
16. Goddard Space Flight Center (GSFC). Space Physics Data Facility (SPDF). OMNIWeb Service – NASA. URL: https://omniweb.gsfc.nasa.gov/html/ow_data.html
17. *Sola J.V., Sevilla J.* Importance of input data normalization for the application of neural networks to complex industrial problems // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 1997. Vol. 44, No. 3. P. 1464–1468.
<https://doi.org/10.1109/23.589532>
18. *Oliveira L. de, Paganini M., Nachman B.* Learning Particle Physics by Example: Location-Aware Generative Adversarial Networks for Physics Synthesis // *Comput. Softw. Big. Sci.* 2017. 1. 4.
19. *Brock J. Donahue, Simonyan K.* Large scale GAN training for high fidelity natural image synthesis. URL: <https://arxiv.org/abs/1809.1109>
20. *Park T., Liu M.-Y., Wang T.-C., Zhu J.-Y.* Semantic Image Synthesis with Spatially-Adaptive Normalization. URL: <https://arxiv.org/abs/1903.07291>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



СИНГИН Александр Николаевич – аспирант, ассистент кафедры Прикладной математики и искусственного интеллекта Национального исследовательского университета «МЭИ».

Alexander Nikolaevich SINGIN – PhD student and assistant at the Department of “Applied Mathematics and Artificial Intelligence”, National Research University “MPEI”.

email: sasha.singin@gmail.com

ORCID: 0009-0009-6781-8644



ЩИРЫЙ Андрей Олегович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва.

SCHIRIY Andrey Olegovich – PhD (Candidate of Technical Sciences), senior researcher at the Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences (IZMIRAN), Moscow.

email: andreyschiriy@gmail.com

ORCID: 0000-0001-7312-4424

Материал поступил в редакцию 30 мая 2026 года