

УДК 004.85:004.946

DOI: [10.26102/2310-6018/2025.50.3.012](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.50.3.012)

Применение методов машинного обучения в технологиях виртуальной реальности

Д.А. Поздняков, Т.В. Азарнова✉

Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация

Резюме. В последние годы развитие технологий виртуальной реальности (VR) во многом связано с внедрением методов машинного обучения (ML). Применение методов ML направлено на повышение уровня комфортности, эффективности и результативности VR. Алгоритмы ML могут анализировать данные о взаимодействиях, распознавать паттерны и адаптировать сценарии взаимодействия на основе поведения и эмоционального состояния пользователя. В статье анализируются ключевые современные направления совместного использования VR и ML, которые уже прошли практическую апробацию и показали достаточно высокую эффективность. Одним из таких направлений является улучшение взаимодействия в VR, включающее повышение качества VR-систем, более реалистичную графику, адаптацию контента под пользователя и точное отслеживание движений. Рассмотрены проблемы применения ML в технологиях VR в сфере образования, психотерапии, реабилитации, медицине, управлении дорожным движением, технологиях создания, передачи, распределения, хранения и использования электроэнергии и других сферах. Проведен также краткий анализ инструментов ML, применяемых в VR, среди которых можно выделить генеративные нейросети, способные создавать динамичные виртуальные среды. Исследование показывает, что сочетание VR и ML открывает новые возможности для создания интеллектуальных и интерактивных систем, может привести к значительным прорывам не только в VR, но и в смежных технологических областях.

Ключевые слова: технологии виртуальной реальности, машинное обучение, эффективность машинного обучения, адаптивные алгоритмы, образование, медицина, реабилитация.

Для цитирования: Поздняков Д.А., Азарнова Т.В. Применение методов машинного обучения в технологиях виртуальной реальности. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2025;13(3). URL: <https://moitvivr.ru/ru/journal/pdf?id=1969> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.50.3.012

Application of machine learning methods in virtual reality technologies

D.A. Pozdnyakov, T.V. Azarnova✉

Voronezh State University, Voronezh, the Russian Federation

Abstract. In recent years, the development of virtual reality (VR) technologies has been largely associated with the introduction of machine learning (ML) methods. The use of ML methods is aimed at increasing the level of comfort, efficiency and effectiveness of VR. ML algorithms can analyze interaction data, recognize patterns and adapt interaction scenarios based on the user's behavior and emotional state. The article analyzes the key modern areas of joint use of VR and ML, which have already been tested in practice and have shown fairly high efficiency. One of these areas is improving interaction in VR, including improving the quality of VR systems, more realistic graphics, adapting content to the user and accurate tracking of movements. The article considers the problems of using ML in VR technologies in the field of education, psychotherapy, rehabilitation, medicine, traffic management, in technologies for the creation, transmission, distribution, storage and use of electricity and other areas. A brief analysis of ML tools used in VR is also provided, among which generative neural networks can be distinguished that can create dynamic virtual environments. The study shows

that the combination of VR and ML opens up new possibilities for creating intelligent and interactive systems and can lead to significant breakthroughs not only in VR but also in related technology areas.

Keywords: virtual reality technologies, machine learning, machine learning efficiency, adaptive algorithms, education, medicine, rehabilitation.

For citation: Pozdnyakov D.A., Azarnova T.V. Application of machine learning methods in virtual reality technologies. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2025;13(3). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1969> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.50.3.012

Введение

Виртуальная реальность – это иммерсивная технология, которая создает искусственную среду, позволяя пользователям взаимодействовать с 3D-объектами и пространствами. Основные технологии, задействованные в VR, включают шлемы виртуальной реальности, трекеры движений и контроллеры [1].

Машинное обучение, в свою очередь, является одним из основных направлений развития искусственного интеллекта и занимается разработкой алгоритмов, которые могут обучаться на данных, осуществлять их структурный анализ, выявлять скрытые закономерности и прогнозировать значения целевых признаков.

Комбинация технологий VR и ML может быть направлена на развитие и улучшение уже существующих VR технологий. Эти технологии могут включать в себя приложения в сфере образования, медицины, развлекательной индустрии и производства. Алгоритмы машинного обучения используются для разработки более интерактивных и адаптивных пользовательских интерфейсов. Данные алгоритмы помогают улучшить восприятие пользователями виртуальной среды, что делает взаимодействие более естественным и продуктивным. Алгоритмы машинного обучения позволяют анализировать поведение пользователей в реальном времени и адаптировать содержание и сложность взаимодействия, что значительно улучшает пользовательский опыт.

Материалы и методы

Применение ML для улучшения взаимодействия в VR. Одним из ключевых направлений использования методов машинного обучения в технологиях виртуальной реальности является улучшение комфортности, эффективности и результативности применения данных технологий.

Алгоритмы ML могут анализировать данные о взаимодействиях, распознавать паттерны и адаптировать сценарии взаимодействия на основе поведения и эмоционального состояния пользователя [2]. Например, линейный регрессионный анализ может использоваться для предсказания успешности взаимодействия:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n + \epsilon, \quad (1)$$

где y – зависимая переменная (например, вероятность успешного взаимодействия), x_i – независимые переменные (факторы взаимодействия), β_i – коэффициенты, которые обучаются на данных, а ϵ – ошибка.

Логистическая регрессия может использоваться для оценки вероятности того, что пользователь испытывает трудности при управлении объектом:

$$P(y = 1|X) = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n)}}, \quad (2)$$

где $P(y = 1|X)$ – вероятность того, что пользователь испытывает трудности при управлении объектом, x_i – индикаторы управления.

Если пользователь испытывает трудности с управлением объектом, ML-алгоритмы могут своевременно предложить подсказки или изменить параметры взаимодействия для облегчения процесса, используя графическую визуализацию данных для лучшего понимания паттернов поведения.

Алгоритмы ML в сочетании с технологиями компьютерного зрения могут распознавать эмоции пользователей по лицевым выражениям и жестам [3, 4]. Это открывает возможность для адаптации виртуальной среды в зависимости от эмоционального состояния пользователя. Например, в обучающих VR приложениях, если система определяет, что студент испытывает стресс, она может снизить уровень сложности задач, обеспечивая комфортную атмосферу для обучения [4].

Алгоритмы машинного обучения могут автоматически генерировать 3D-объекты и анимации, что значительно облегчает и ускоряет процесс разработки [5]. Это позволяет разработчикам сосредотачиваться на более важных аспектах, таких как пользовательский опыт и содержание приложения.

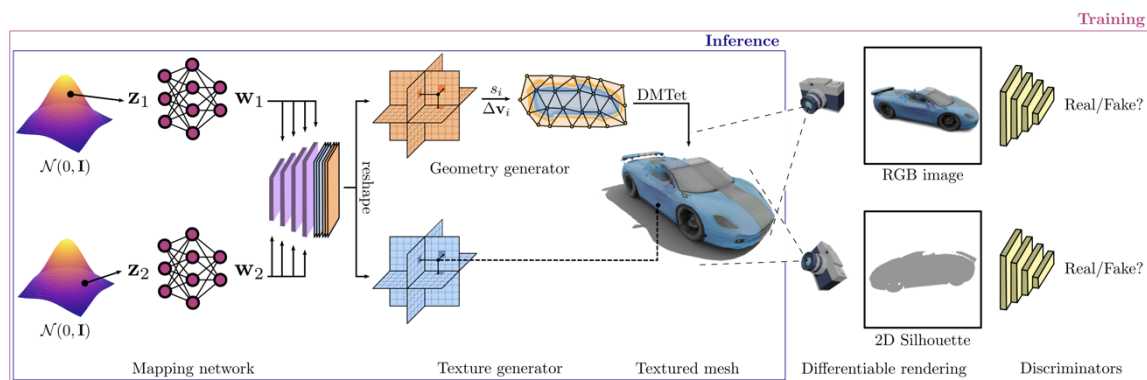


Рисунок 1 – Генерация 3D-моделей с помощью машинного обучения
Figure 1 – 3D models generation using machine learning

Кроме того, системы распознавания жестов и голосового управления, основанные на ML, становятся важными элементами управления в VR. Эти технологии позволяют пользователям взаимодействовать с виртуальными объектами без необходимости использования традиционных контроллеров. Они обеспечивают большую свободу движений и делают интерфейсы более интуитивно понятными. Например, такие компании, как Leap Motion, разрабатывают основанные на машинном обучении решения для отслеживания движений рук, что позволяет пользователям манипулировать виртуальными объектами только с помощью жестов [6].

Применение ML в VR технологиях обучения и образования. Технологии виртуальной реальности уже продемонстрировали свою эффективность в области образования, позволяя создавать симуляции, которые помогают учащимся лучше понимать сложные концепции. Машинное обучение добавляет еще один слой адаптивности в образовательно-учебные VR-программы. С помощью анализа данных об успеваемости и взаимодействии студентов, алгоритмы могут подстраивать учебный процесс под индивидуальные потребности каждого ученика. Это включает в себя предоставление персонализированных заданий, рекомендаций по материалам и динамическую настройку сложности задач [7].

Широкое использование VR и ML нашло в медицинских учебных заведениях, где студенты могут проводить виртуальные операции или исследования. С помощью машинного обучения эти симуляции могут адаптироваться к уровню квалификации учащихся, предоставляя обратную связь и рекомендации, что в конечном итоге улучшает

качество обучения. Такой подход не только повышает вовлеченность, но и способствует лучшему усвоению материала, позволяя студентам учиться на своих ошибках в безопасной и контролируемой среде.

В медицине виртуальная реальность уже зарекомендовала себя как инструмент для тренировки хирургов, лечения фобий и управления болевыми синдромами. Использование методов машинного обучения в этой области открывает новые возможности для повышения точности и эффективности лечения. Например, ML-алгоритмы могут анализировать данные о состоянии пациента и предсказывать, какая терапия будет наиболее эффективной. Это может включать не только традиционное лечение, но и VR-терапии, которые могут быть адаптированы в зависимости от индивидуальных предпочтений и чувствительности пациента [8].

В работе [9] детально обсуждаются проблемы применения в медицинском образовании виртуальных пациентов, симуляторов, тренажеров, базирующихся на технологиях VR и ML. Рассматриваются: терминология, классификация медицинских виртуальных симуляторов, специфика и эффективность обучения в виртуальной среде с помощью цифровых технологий. В работе проведен анализ сильных и слабых сторон виртуальных симуляторов, с точки зрения иерархии Маслоу рассмотрено медицинское образование в виртуальной среде, проведена оценка возможности выполнения VR-системами основных функций преподавателя по Рональду Хардену и в целом оценка потенциала замещения преподавателя в некоторых из функций на ML и VR, сформулированы необходимые требования к архитектуре медицинских образовательных систем виртуальной реальности, предложены варианты формирования учебных планов на стыке традиционных и виртуальных методик обучения.

Интересное исследование по применению технологий виртуальной реальности и машинного обучения для разработки образовательных технологий для детей с ограниченными возможностями описано в работе [10]. Авторы используют возможности и инструменты виртуальной реальности и машинного обучения для создания обучающей платформы для детей с аутизмом (РАС). Виртуальная реальность (VR), как и другие компьютерные технологии обеспечивает особенно благоприятную среду для людей с РАС, поскольку она предлагает структуру, визуальное посредничество в обучении, возможности повторения, аффективное вовлечение и дополнительный контроль над средой обучения. Технология виртуальной реальности имеет несколько сильных сторон с точки зрения потенциального применения к вмешательствам при РАС, включая: гибкость, управляемость, повторяемость, модифицированную сенсорную стимуляцию и возможность применять персонализированные подходы и стратегии улучшения. Основной сенсорный вывод VR – слуховой и визуальный, что может представлять собой сокращение информации реального мира, но также обеспечивает полное описание установки без необходимости воображаемых компонентов. Лица с РАС могут совершенствовать свои навыки обучения в ситуации, когда предлагаемая установка может быть представлена в физической или визуальной форме. Виртуальная среда может легко изменять атрибуты, добавлять или удалять объекты способами, которые могут быть невозможны в реальной среде, но могут быть ценными для обучения абстрактным концепциям.

VR также может изображать различные сценарии, которые могут быть невыполнимы в терапевтической обстановке «реального мира» с учетом естественных социальных ограничений и проблем с ресурсами. Таким образом, VR хорошо подходит для создания интерактивных парадигм обучения основным навыкам общения для лиц с РАС. Машинное обучение может дополнить технологии виртуальной реальности путем создания для каждого ученика персонализированного образовательного опыта.

Машинное обучение в форме предиктивной аналитики используется для того, чтобы делать выводы о том, что может произойти в будущем.

Применение ML в VR технологиях психотерапии, реабилитации и медицине.

В последние годы VR применяется в психотерапии, особенно в лечении посттравматического стрессового расстройства (ПТСР). Методы машинного обучения могут быть использованы для анализа поведения клиентов, а также для адаптации сценариев в зависимости от их реакций. Например, алгоритмы могут отслеживать уровень тревожности пациентов и изменять интенсивность терапии в реальном времени [11].

Виртуальные симуляторы также используются в процессе реабилитации после травм [12]. Они позволяют пациентам выполнять упражнения в игровой форме, одновременно собирая данные о их прогрессе. ML может анализировать собранные данные для определения наиболее эффективных реабилитационных программ для каждого конкретного пациента [13].

Применение ML и VR технологий в управлении дорожным движением.

Новаторский проект под руководством Университета штата Луизиана, использовал возможности виртуальной реальности (VR) и машинного обучения (ML) для повышения прогностических возможностей систем управления дорожным движением. Исследователи предложили инновационные методологии улучшения моделей выбора маршрута – важнейшего компонента управления дорожным движением.

Традиционные модели управления дорожным движением часто полагаются на статические контекстные условия, не учитывая динамические переменные, которые могут существенно влиять на поведение водителя. Такие факторы, как дорожно-транспортные происшествия, социально-экономическая ситуация и дорожные условия в реальном времени, обычно игнорируются, что приводит к недостаточно точным и актуальным прогнозам. Целью анализируемого проекта было устранение указанных ограничений путем создания контекстно-зависимых, высокоточных моделей, которые могут адаптироваться к меняющимся условиям.

Исследователи использовали интерактивную виртуальную среду (IVE) для моделирования реальных сценариев вождения, что позволило им собрать обширные контекстные данные о том, как водители реагируют в реальных ситуациях, особенно во время экстремальных событий, таких как ураганы или наводнения. В процессе исследования была разработана методология интеграции виртуальной реальности и машинного обучения. Разработанная методология включала в себя ознакомление участников с несколькими сценариями вождения, фиксацию их процессов принятия решений при движении в условиях обычного, среднего и интенсивного трафика. Данные собирались с помощью экспериментов с заявленным выбором (SCE), в которых участники выбирали маршрут на основе представленных условий. Было реализовано десять экспериментальных сценариев, чтобы получить исходные данные о динамическом поведении водителей при выборе маршрута с учетом возникающих контекстуальных факторов. Каждый сценарий учитывал следующие контекстуальные факторы: плотность движения (нормальная, средняя и интенсивная), тип поездки (срочная и несрочная), выбор маршрута другими водителями. В исследовании использовалось повествование по ходу эксперимента, чтобы помочь участникам осуществлять все шаги без разрыва связи с VR. Основной переменной, представляющей интерес (зависимой переменной) в данном исследовании, был выбор маршрута, в то время как контекстуальные факторы рассматривались как независимые переменные.

Широко используемые базовые модели выбора маршрута используют выявленные предпочтения для моделирования выбора маршрута. На Рисунке 4 показаны прогнозы выбора маршрута, сделанные базовой моделью выбора маршрута на

агрегированном уровне (синяя линия), в сравнении с реальными данными, собранными в полевых условиях (красная линия).

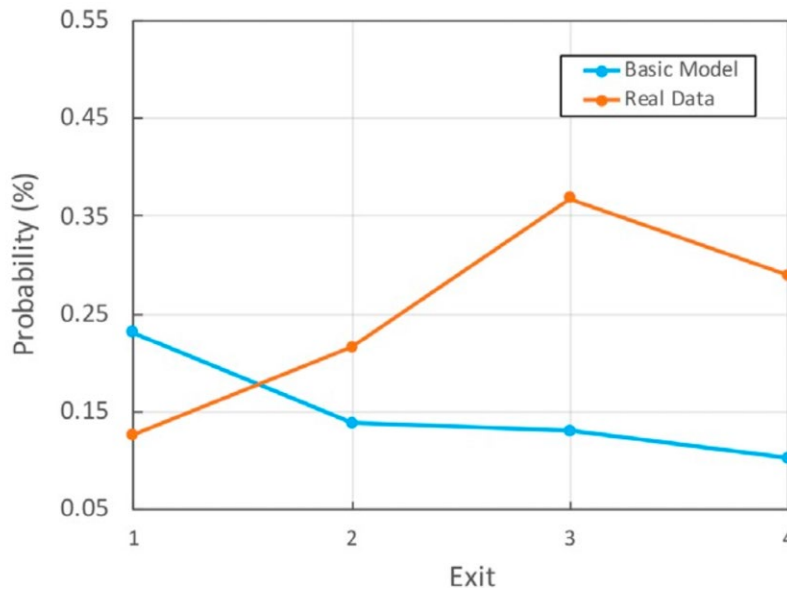


Рисунок 2 – Прогнозы выбора маршрута
Figure 2 – Route selection predictions

Проблема состояла в том, что базовые модели выбора маршрута не учитывали динамические контекстуальные условия SCE, в рамках исследования на основе технологий виртуальной реальности и машинного обучения был разработан новый подход к созданию высокоточных моделей выбора маршрута с повышенной предсказательной способностью путем дополнения существующих базовых моделей информацией о реакции водителей на контекстуальные факторы за счет использования знаний нейронной сети, предварительно обученной на данных о реакции водителей на контекстуальные факторы. Общая архитектура системы показана на Рисунке 3.

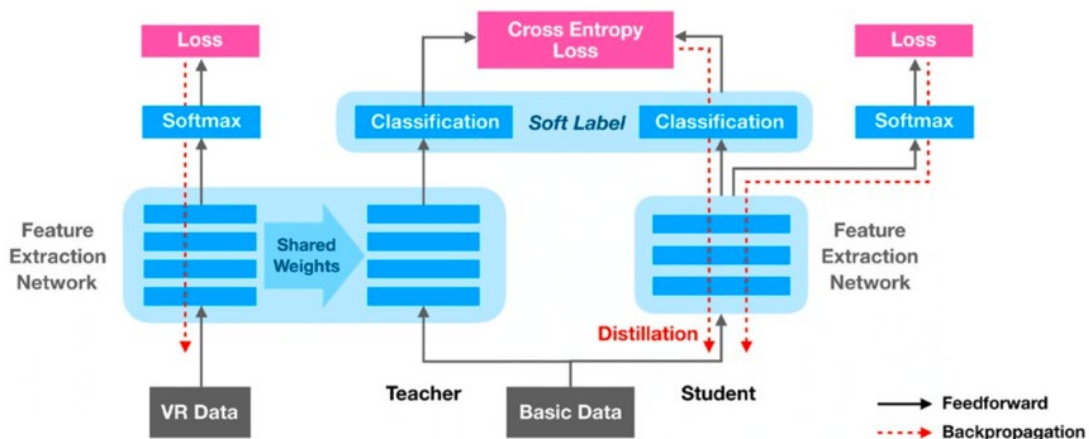


Рисунок 3 – Общая архитектура системы
Figure 3 – General system architecture

После дистилляции знаний точность прогнозирования на тестовом наборе базовых данных резко повышается: она достигает точности классификации 95,2 % на базовых данных.

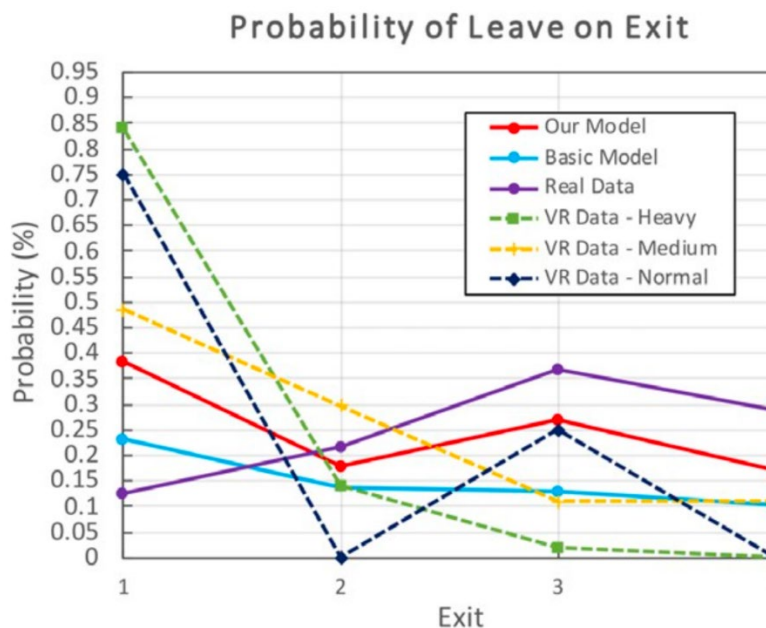


Рисунок 4 – Сравнение вероятности выбора маршрута, полученной с помощью дополненной модели (красная линия) с базовой моделью (синяя линия), реальными данными (фиолетовая линия)

Figure 4 – Comparison of the route choice probability obtained using the augmented model (red line) with the base model (blue line), real data (purple line)

Результаты исследования показали, что предсказания дополненных моделей, созданных с помощью нового подхода, гораздо ближе к реальности, чем предсказания базовых моделей.

Применение ML и VR в технологиях создания, передачи, распределения, хранения и использования электроэнергии. Технология создания, передачи, распределения, хранения и использования электроэнергии обеспечивает работу многих других современных технологий. Важно понимать современные тенденции для обеспечения безопасности, предсказуемости, сохранности, надежности в этой области. Эффективными инструментами достижения данной цели являются методы машинного обучения, искусственного интеллекта, обработки и анализа больших данных и технологий виртуальной реальности.

В статье [14] рассматриваются процессы обеспечения безопасности в электрической сети и их моделирование в виртуальной реальности с использованием технологий машинного обучения. Электроэнергия рассматривается как общий ресурс, который генерируется, распределяется и используется в режиме реального времени. Обсуждается применение алгоритмов машинного обучения для поиска новых материалов для производства более надежных аккумуляторов, которые не так сильно загрязняют окружающую среду, и возможность создания распределенных энергоресурсов и управления виртуальной электростанцией с помощью прогнозного анализа. Исследуется применение технологии виртуальной реальности для моделирования и реалистичной визуализации процессов и явлений в области энергетики с целью обучения и ознакомления студентов, ученых и электротехников с: физико-химическими процессами, лежащими в основе электроэнергетики, работой электростанций и подстанций, возможными чрезвычайными ситуациями, устранением и предотвращением аварий, компенсацией и хранением электроэнергии в случае ее дефицита или избытка. Рассматривается применение машинного обучения для ускорения процесса поиска современных решений проблем в этой области, таких как

обращение с отходами, такими как выбросы углерода и радиоактивные отходы, ускорение поиска новых элементов для использования в качестве ядерного топлива, диэлектриков, для хранения электронов и других.

Результаты и обсуждение

Проблемы и сложности внедрения ML в VR технологиях. Несмотря на множество преимуществ, использование машинного обучения в виртуальной реальности сталкивается с рядом проблем и вызовов. Во-первых, для успешного применения ML требуется значительное количество данных для обучения моделей. Собрать и обработать такие данные может быть трудоемким и затратным процессом. Кроме того, качество данных напрямую влияет на результат – плохая или неполная информация может привести к неточным предсказаниям и негативному пользовательскому опыту [15].

Другой значимой проблемой является необходимость в мощных вычислительных ресурсах. Алгоритмы машинного обучения, особенно глубокие нейронные сети, требуют значительных объемов вычислительных мощностей, которые не всегда доступны в условиях VR. Для решения этой проблемы необходимо разрабатывать более эффективные алгоритмы и методы оптимизации, которые смогут работать в реальном времени с ограниченными ресурсами.

Направления развития технологий VR с применением машинного обучения. Проведенный анализ показывает, что дальнейшее развитие методов машинного обучения будет способствовать созданию более сложных и адаптивных VR-приложений [16]. В частности, можно ожидать улучшения в области естественного языка и распознавания эмоций, что позволит создать более глубокие и эмоционально насыщенные взаимодействия между пользователями и виртуальными мирами.

С развитием технологий аппаратного обеспечения откроются новые возможности для внедрения ML в VR-приложения. Более мощные и доступные устройства позволят разработчикам реализовывать сложные алгоритмы, возможно появление новых форматов контента и способов взаимодействия, которые в корне изменят восприятие виртуальных пространств.

Заключение

Методы машинного обучения открывают новые возможности для технологий виртуальной реальности, значительно улучшая взаимодействие пользователей с виртуальными объектами и обогащая пользовательский опыт. Существует целый ряд перспективных научных направлений развития VR за счет использования ML-технологий, от решения которых зависит будущее данных технологий. Спектр внедрения инструментов виртуальной реальности, дополненных возможностями машинного обучения, включает широкий спектр прикладных областей: образование, медицина, энергетика, управление в социальных и экономических системах, психология. В последние годы данный список демонстрирует уверенную тенденцию расширения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Vince J. *Introduction to Virtual Reality*. London: Springer; 2004. 163 p. <https://doi.org/10.1007/978-0-85729-386-2>
2. Ayeni O.O., Al Hamad N.M., Chisom O.N., Osawaru B., Adewusi O.E. AI in Education: A Review of Personalized Learning and Educational Technology. *GSC Advanced Research and Reviews*. 2024;18(02):261–271. <https://doi.org/10.30574/gscarr.2024.18.2.0062>

3. Fathy F., Mansour Ya., Sabry H., Refat M., Wagdy A. Virtual Reality and Machine Learning for Predicting Visual Attention in a Daylit Exhibition Space: A Proof of Concept. *Ain Shams Engineering Journal*. 2023;14(6). <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.102098>
4. M A., G V. Enhancing the Potential of Machine Learning for Immersive Emotion Recognition in Virtual Environment. *EAI Endorsed Transactions on Scalable Information Systems*. 2024;11(4). <https://doi.org/10.4108/eetsis.5036>
5. Bai S., Li J. Progress and Prospects in 3D Generative AI: A Technical Overview Including 3D Human. arXiv. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.02620> [Accessed 2nd March 2025].
6. Weichert F., Bachmann D., Rudak B., Fisseler D. Analysis of the Accuracy and Robustness of the Leap Motion Controller. *Sensors*. 2013;13(5):6380–6393. <https://doi.org/10.3390/s130506380>
7. Horbova M., Andrunyk V., Chyrun L. Virtual Reality Platform Using ML for Teaching Children with Special Needs. CEUR Workshop Proceedings. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2631/paper16.pdf> [Accessed 5th April 2025].
8. Samadbeik M., Yaaghobi D., Bastani P., Abhari Sh., Rezaee R., Garavand A. The Applications of Virtual Reality Technology in Medical Groups Teaching. *Journal of Advances in Medical Education & Professionalism*. 2018;6(3):123–129.
9. Горшков М.Д. *Виртуальная реальность и искусственный интеллект в медицинском образовании*. Москва: РОСМЕД; 2023. 252 с.
10. Didehbani N., Allen T., Kandalafi M., Krawczyk D., Chapman S. Virtual Reality Social Cognition Training for Children with High Functioning Autism. *Computers in Human Behavior*. 2016;62:703–711. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2016.04.033>
11. Maples-Keller J.L., Bunnell B.E., Kim S.-J., Rothbaum B.O. The Use of Virtual Reality Technology in the Treatment of Anxiety and Other Psychiatric Disorders. *Harvard Review of Psychiatry*. 2017;25(3):103–113. <https://doi.org/10.1097/HRP.0000000000000138>
12. Tokgöz P., Stampa S., Wähnert D., Vordemvenne Th., Dockweiler Ch. Virtual Reality in the Rehabilitation of Patients with Injuries and Diseases of Upper Extremities. *Healthcare*. 2022;10(6). <https://doi.org/10.3390/healthcare10061124>
13. Bateni H., Carruthers J., Mohan R., Pishva S. Use of Virtual Reality in Physical Therapy as an Intervention and Diagnostic Tool. *Rehabilitation Research and Practice*. 2024;2024. <https://doi.org/10.1155/2024/1122286>
14. Budakova D., Vasilev V., Stefanov S. Machine Learning and Virtual Reality Technology in Power Engineering. In: *AIP Conference Proceedings: Proceedings of the International Conference on Mathematical Sciences and Technology 2022 (MathTech 2022): Volume 2980, 13–15 September 2022, Malaysia, Georgetown*. AIP Publishing; 2024. <https://doi.org/10.1063/5.0184757>
15. Baniasadi T., Ayyoubzadeh S.M., Mohammadzadeh N. Challenges and Practical Considerations in Applying Virtual Reality in Medical Education and Treatment. *Oman Medical Journal*. 2020;35(3). <https://doi.org/10.5001/omj.2020.43>
16. Sindu I.G.P., Hartati R.S., Sudarma M., Gunantara N. Systematic Literature Review of Machine Learning in Virtual Reality and Augmented Reality. *Jurnal Nasional Pendidikan Teknik Informatika*. 2023;12(1):108–118. <https://doi.org/10.23887/janapati.v12i1.60126>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Поздняков Даниил Александрович, аспирант кафедры математических методов исследования операций, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация.

e-mail: daniil.pozdnyakov.00@mail.ru

ORCID: [0009-0002-5601-9651](https://orcid.org/0009-0002-5601-9651)

Daniil A. Pozdnyakov, Postgraduate at the Department of Mathematical Methods of Operations Research, Voronezh State University, Voronezh, the Russian Federation.

Азарнова Татьяна Васильевна, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры математических методов исследования операций, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация.

e-mail: ivdas92@mail.ru

ORCID: [0000-0001-6342-9355](https://orcid.org/0000-0001-6342-9355)

Tatiana V. Azarnova, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor at the Department of Mathematical Methods of Operations Research, Voronezh State University, Voronezh, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 24.05.2025; одобрена после рецензирования 01.07.2025; принята к публикации 07.07.2025.

The article was submitted 24.05.2025; approved after reviewing 01.07.2025; accepted for publication 07.07.2025.