



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-31-3-76-83>

УДК 004.946

РАЗВИТИЕ ВИРТУАЛЬНЫХ АНАТОМИЧЕСКИХ ЛАБОРАТОРИЙ НА ПРИМЕРЕ ПРАКТИКИ В МЕДИЦИНСКОМ ОБРАЗОВАНИИ

ШАН ВЭНЬЛИ, Е. И. КОЗЛОВА

Белорусский государственный университет (Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. Рассмотрены аспекты применения иммерсивных технологий при создании виртуальной анатомической студенческой лаборатории, такие как разработка и оптимизация пространственных моделей, практическая реализация системы и перспективы на будущее. Предложены рекомендации по дальнейшему совершенствованию и оптимизации виртуальных анатомических лабораторий, отмечены перспективы применения технологий виртуальной реальности в медицинском образовании и клинической практике.

Ключевые слова: иммерсивные технологии, виртуальная реальность, анатомия, Unity3D, моделирование, сценарии.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Шан, Вэньли. Развитие виртуальных анатомических лабораторий на примере практики в медицинском образовании / Шан Вэньли, Е. И. Козлова // Цифровая трансформация. 2025. Т. 31, № 3. С. 76–83. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-31-3-76-83>.

DEVELOPMENT OF VIRTUAL ANATOMY LABORATORIES IN PRACTICE IN MEDICAL EDUCATION

SHANG WENLI, E. I. KOZLOVA

Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The aspects of using immersive technologies in creating a virtual anatomical student laboratory are considered, such as the development and optimization of spatial models, practical implementation of the system and future prospects. Recommendations for further improvement and optimization of virtual anatomical laboratories are proposed, and the prospects for using virtual reality technologies in medical education and clinical practice are noted.

Keywords: immersive technologies, virtual reality, anatomy, Unity3D, modeling, scenarios.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interest.

For citation. Shang Wenli, Kozlova E. I. (2025) Development of Virtual Anatomy Laboratories in Practice in Medical Education. *Digital Transformation*. 31 (3), 76–83. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-31-3-76-83> (in Russian).

Введение

Технологии виртуальной реальности (VR) благодаря своим иммерсивным интерактивным возможностям активно завоевывают позиции в различных областях [1]. Путем моделирования формы, размера и движения реальных объектов VR-технология может обеспечить визуальный опыт, близкий к реальности, в цифровом мире [2]. В медицинской сфере применение VR-технологии особенно перспективно. В настоящее время по всему миру реализуется множество проектов, исследующих применение VR-технологий в медицинском образовании, и рыночная стоимость медицинского VR-обучения неуклонно растет [3–7]. В традиционном анатомическом обучении существуют определенные ограничения, такие как невозможность завершения полного экспериментального процесса и наблюдение за каждым органом в здоровом состоянии, ограничение времени обучения или исследования, недостаток исследовательского или обучающего анатомического материала. Кроме того, некоторые органы, например, сосуды, имеют сложную структуру, которую трудно показать отдельно и восстановить в исходное состояние. Используя VR-технологии, можно создать реалистичные модели сцен и соответствующие экспериментальные действия, позволяя студентам получать знания и опыт, аналогичные реальной лаборатории, и многократно наблюдать и манипулировать этими структурами в виртуальной среде. В отличие от реальной среды, где все операции и действия зачастую не могут быть выполнены повторно, в виртуальной или операционной лаборатории модель может быть восстановлена в исходное состояние. Обучающиеся могут наблюдать весь процесс, отслеживать состояние органов и получать практический опыт в ходе операций. Это не только экономит учебные ресурсы, но и позволяет достигать лучших образовательных результатов.

В статье рассмотрена виртуальная учебная анатомическая лаборатория и исследован ее потенциал для улучшения интерактивного изучения анатомии. Представлена разработанная модель виртуальной учебной лаборатории, предназначенной для визуализации и интерактивного изучения анатомической структуры человека.

Эволюция и оптимизация виртуальных анатомических лабораторий

Развитие виртуальных анатомических лабораторий можно проследить с ранних достижений в области компьютерной графики и виртуальной реальности. Этот процесс включает несколько ключевых этапов [8–11]:

- первоначальные исследования и формирование концепции – 1970-е гг.;
- трехмерное моделирование и визуализация – 1980–1990-е гг.;
- внедрение технологий виртуальной реальности – конец 1990-х – начало 2000-х гг. – создание иммерсивных виртуальных анатомических моделей и организация взаимодействия пользователя с ними в виртуальной среде;
- высокоточные модели и интерактивность в реальном времени: с конца 2000-х по настоящее время. Более детализированные и реалистичные анатомические модели, интерактивные технологии в реальном времени, что позволяет пользователям выполнять сложные и детализированные анатомические эксперименты, включая моделирование хирургических процессов и патологических изменений.

Ранние технологии моделирования использовали простые геометрические формы и ручные анатомические рисунки [12]. Затем трехмерная реконструкция на основе изображений прибегла к обработке и объединению большого количества изображений с помощью алгоритмов сегментации изображений и трехмерной реконструкции, что позволяло создавать более детализированные анатомические модели [13]. Последовавший переход к высокоточным анатомическим моделям [14] потребовал применения данных высокоразрешающей визуализации, передовых алгоритмов моделирования и графической обработки. Развитие технологий рендеринга в реальном времени, в том числе на основе физических явлений (PBR) [15], позволило пользователям взаимодействовать с высокоточными анатомическими моделями в виртуальной среде в режиме реального времени. В последние годы в дизайне виртуальных анатомических моделей широко используются технологии слияния многомодальных данных [16]. Объединяя данные визуализации из разных источников (таких как КТ, МРТ, УЗИ и т. д.), исследователи могут создавать более полные и точные анатомические модели. Кроме того, функциональные данные, такие как электроэнцефалограммы, электрокардиограммы и т. д., также интегрируются в модели, позволяя виртуальной анатомической лаборатории не только демонстрировать анатомические структуры, но и моделировать физиологические функции.

Последние разработки в области дизайна и оптимизации моделей включают использование технологий искусственного интеллекта и машинного обучения [17]. Эти технологии могут автоматически обрабатывать и анализировать большое количество медицинских изображений, улучшая эффективность и точность создания моделей. Алгоритмы машинного обучения могут автоматически выполнять сегментацию изображений, извлечение признаков и оптимизацию моделей, значительно сокращая количество ручных вмешательств и ошибок. Кроме того, технологии дополненной реальности на основе глубокого обучения позволяют моделям динамически взаимодействовать и адаптироваться в реальном времени. Благодаря этим технологическим достижениям виртуальные анатомические лаборатории могут предоставлять более реалистичные и всесторонние учебные и исследовательские платформы, способствуя развитию медицинского образования и научных исследований.

Процесс разработки виртуальных анатомических лабораторий

Создание систем виртуальной реальности неразрывно связано с поддержкой компьютеров, специализированного оборудования, прикладного программного обеспечения и баз данных [18]. Для реализации взаимодействия между виртуальным и реальным мирами требуются устройства ввода/вывода, такие как манипуляторы. В настоящее время распространены захватные устройства для жестового управления, системы обработки и синтеза звука для голосового взаимодействия, шлемы или очки для визуального взаимодействия и т. д.

Для создания виртуальной среды необходимо использовать специальное программное обеспечение для формирования моделей, сцен и материалов в них. Для этого применяются 3ds Max, Maya и другие приложения для создания виртуальных моделей, Photoshop для настройки текстур. При организации пользовательского взаимодействия используются, например, такие программные средства, как AU [19] для создания аудиоматериалов и Adobe Premiere [20] для создания видеоматериалов. Далее с использованием специального движка необходимо сформировать систему виртуальной реальности. В настоящее время наиболее распространенными среди таких виртуальных движков являются Unity3D, Converse3D, Virtools, UE4, UE5. Все данные этих систем должны храниться в базе данных, как показано на рис. 1.

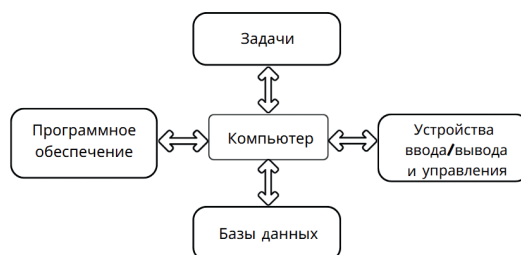


Рис. 1. Компоненты системы виртуальной реальности
Fig. 1. Components of a virtual reality system

Один из важных элементов VR-приложения – качественная система просмотра, способная обеспечить пользователям реалистичный опыт [21, 22], поскольку именно она является своеобразным мостом между виртуальной средой и реальным миром. Другой важнейший компонент – чувствительная система отслеживания, которая способна быстро распознавать движения человека и обеспечивать более полный и реалистичный опыт погружения в виртуальную среду.

Пользовательский опыт в виртуальной анатомической лаборатории является важным показателем эффективности построенной среды. Его ключевые факторы – интерактивность и глубина погружения, эргономичность пользовательского интерфейса, обратная связь и возможность оказания помощи пользователю, мультимодальное взаимодействие со средой, возможность коллективного обучения, получение пользователем персонализированного опыта. В начальной стадии создания виртуальной анатомической технологии пользователи в основном взаимодействуют с моделью через настольный компьютер или проекционное оборудование. Способы взаимодействия ограничены, в основном используются мышь и клавиатура, и уровень погружения пользователя низок. С развитием VR-системы пользователи могут взаимодействовать с виртуальной анатомической моделью более наглядно и иммерсивно с помощью гарнитуры виртуальной реальности (HMD) и устройств отслеживания движения. Этот иммерсивный опыт существенно повышает уровень участия и эффективность обучения пользователей. Хорошо спроектированный

пользовательский интерфейс имеет решающее значение для пользовательского опыта. Дизайн пользовательского интерфейса в виртуальной анатомической лаборатории должен быть простым и интуитивно понятным, чтобы пользователи могли легко выполнять операции и навигацию.

Предоставление обширных пользовательских функций, таких как масштабирование моделей, их вращение, изменение формы, разрезание и т. д., позволяет пользователям настраивать вид и параметры в соответствии с их учебными потребностями, что повышает эффективность обучения. Предоставление реальной обратной связи от системы в процессе взаимодействия помогает пользователям понять сложные анатомические структуры и процессы. Например, когда пользователь выбирает определенный орган или структуру, система предоставляет соответствующую детальную информацию о выбранном объекте и объяснения. Некоторые виртуальные анатомические лаборатории внедряют функцию виртуального наставника, который с помощью технологий искусственного интеллекта предоставляет пользователям персонализированное руководство и рекомендации, помогая им лучше понять и освоить учебный материал. Применение технологий распознавания речи позволяет пользователям управлять операциями с помощью голосовых команд, что повышает удобство и естественность взаимодействия.

Помимо визуальной и звуковой обратной связи, тактильная обратная связь также является важным средством улучшения пользовательского опыта. С помощью устройств обратной связи пользователи могут чувствовать текстуру и сопротивление виртуальной модели, что повышает реализм взаимодействия.

Виртуальные анатомические лаборатории также могут поддерживать одновременное онлайн-взаимодействие нескольких пользователей, способствуя коллективному обучению. Пользователи могут вместе изучать и анализировать модели виртуальной среды, обмениваться опытом и знаниями. Функция виртуального класса позволяет преподавателям проводить реальные занятия в виртуальной среде, а студентам выполнять анатомические эксперименты и упражнения под руководством наставника. Система может также отслеживать прогресс обучения пользователя и записывать его действия, предоставляя персонализированные учебные планы и рекомендации, что помогает пользователям более эффективно овладеть анатомическими знаниями, а посредством регулярной оценки и обратной связи система может помочь пользователям определить слабые моменты в обучении и предложить целевые упражнения и рекомендации по повторению.

Методы разработки систем

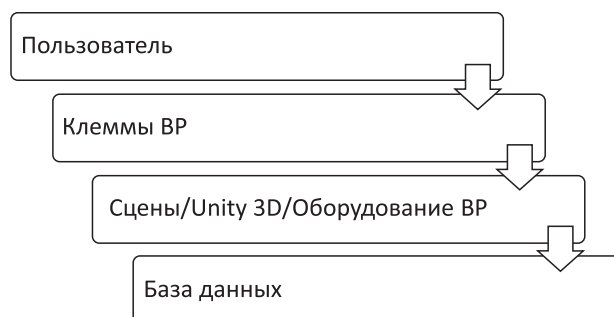
Структура предлагаемой виртуальной анатомической системы включает три основных компонента: платформу виртуальной реальности, удаленную базу данных и оконечные устройства. Эти компоненты взаимодействуют друг с другом, обеспечивая эффективную работу системы.

Платформа виртуальной реальности является ядром данной системы и отвечает за управление работой приложения виртуальной анатомии. С помощью движка Unity3D можно создавать реалистичные виртуальные среды и реализовывать взаимодействие пользователя с окружающей средой.

Для обеспечения хранения и обновления данных используется удаленная база данных. Она содержит различные анатомические модели, данные об окружающей среде и другую информацию, необходимую для системы, чтобы пользователи могли получить доступ к данным в любое время.

Пользователи взаимодействуют с системой через VR-устройства, чтобы получить доступ к виртуальной анатомической среде и выполнить необходимые операции. Эти оконечные устройства подключаются к платформе виртуальной реальности через движок Unity3D, позволяя пользователям погружаться в процесс обучения. Структура виртуальной анатомической системы представлена на рис. 2.

Рис. 2. Структура виртуальной анатомической системы
Fig. 2. Structure of the virtual anatomical system



Исходя из потребностей обычных анатомических экспериментов и технических характеристик виртуальной реальности, для реализации обучающего приложения были выбраны восемь систем человеческого тела (нервная, опорно-двигательная, кровеносная и т. д.) в качестве отправной точки для демонстрации анатомических процессов и состояний различных его систем. Весь процесс производства проводился в несколько этапов.

Проектирование среды и создание управляющих элементов. С использованием программы Photoshop были разработаны карты среды, входные кнопки и восемь кнопок переключения систем. На этом этапе важно проводить наблюдение за реальной лабораторной средой, включая ее площадь, внутреннее расположение и т. д. Это позволяет понять общую структуру и компоновку лаборатории и обеспечить эталон для последующего моделирования [23].

Исследования подтверждают, что выбор цвета и текстуры влияет на удобство взаимодействия с виртуальной средой. Яркие цвета, такие как красный и оранжевый, привлекают внимание, тогда как синий и зеленый способствуют концентрации [24]. В интерфейсах VR наибольшее внимание пользователей привлекают интерактивные элементы, поэтому их цвет должен контрастировать с фоном, а текстура – визуально выделяться для удобной навигации [25]. Кроме того, правильный подбор цвета снижает зрительное утомление, а текстурирование помогает восприятию глубины сцены.

Помимо цветовых решений, важную роль играет точность виртуальной реконструкции лаборатории. Использование специализированного программного обеспечения, такого как AutoCAD, 3ds Max и другие, позволяет воссоздать структуру и детали лаборатории с высокой точностью. Это касается моделирования стен, пола, потолка и других элементов, а также учета расположения мебели в лаборатории.

Управление разрешением и качеством изображения. Были выбраны такие показатели разрешения (1024×1024 px для текстур, 2448×2448 px на глаз для HTC Vive Pro 2, 90/120 Гц – частота обновления), чтобы изображения, используемые для дизайна среды, не отображались размытыми из-за низкого разрешения, но и не вызывали задержек в процессе иммерсии из-за высокой нагрузки на систему. Проведенные исследования показали, что во многих учреждениях образования учебные компьютерные классы укомплектованы оборудованием средней мощности, что также выдвигает свои требования к предлагаемым виртуальным обучающим системам. При разработке данной системы учитывались требования к построению моделей с минимально возможным разрешением и скоростью обработки данных при перестроении сцен, при этом обращалось внимание на корректность отображения и его реалистичность.

Создание моделей среды. После создания моделей среды всей лаборатории проводились отладка отображения среды и настройка освещения. Это включало моделирование стен, пола и других элементов лаборатории, а также настройку освещения для обеспечения реализма и комфорта среды. Далее разрабатывались модели восьми систем человеческого тела с учетом требований высокой точности и реализма, чтобы пользователи могли точно изучать и понимать структуру и функции человеческого тела, а также снижения разрешения для экономии ресурсов компьютера. После завершения создания всех моделей особое внимание обращалось на правильное их размещение в виртуальной среде. Расположение моделей в пространстве виртуальной лаборатории, их положение друг относительно друга и пользователя в процессе обучения оказывают существенное влияние на самочувствие пользователя, вплоть до потери им ориентации, возникновения головокружения и симптомов морской болезни, других нежелательных эффектов. Во избежание нежелательных последствий необходимо точно соблюдать линии и углы поворотов как самих анатомических моделей, так и смоделированного помещения – лаборатории, окон, мебели в ней и т. д.

Проектирование интерактивных действий. Добавление интерактивных действий в систему позволяет пользователям выполнять определенные действия с анатомическими моделями с помощью шлема HTC VIVE и контроллеров. Эти действия включают перетаскивание, масштабирование, вращение и т. д., чтобы усилить иммерсию и участие пользователя.

Тестирование и отладка системы. Проведение функционального тестирования и тестирования производительности системы, чтобы гарантировать стабильную работу и соответствие ожидаемым функциональным требованиям, является необходимым этапом проектирова-

ния VR-систем. В дальнейшем на основе результатов тестирования вносятся изменения и проводится оптимизация системы. Это может включать в себя исправление ошибок программного обеспечения, повышение производительности, улучшение пользовательского опыта и т. д.

Схема процесса разработки модели виртуальной учебной анатомической лаборатории приведена на рис. 3.



Рис. 3. Схема процесса разработки модели виртуальной учебной анатомической лаборатории
Fig. 3. Flow chart of the development process of a virtual anatomy teaching laboratory model

Интерактивный дизайн системы включает в себя процессы реализации движений, создания и реализации управляющих элементов, в данном случае – кнопок. В разработанной виртуальной лаборатории все движения в сценах представлены от первого лица. Для отображения движений использованы готовые префабы в Unity и ограничено автоматическое вращение объектов. Скрипты полностью контролируют вращение префаба, предотвращая его опрокидывание из-за физических эффектов. Затем главная камера должна быть установлена как дочерний элемент объекта, чтобы можно было настроить позицию камеры для достижения наилучшего эффекта – точного соответствия ее положения и угла обзора движений пользователя, исключая смещение и рассинхронизацию. Главная цель – установить вид от первого лица, а затем подключить скрипт для его размещения на префабе. Движение объектов в сцене можно реализовать с помощью операций интерполяции Vector3 среды Unity.

Для осуществления перехода между интерфейсами системы виртуальной реальности необходимы управляющие элементы, реализованные в данном случае в виде кнопок, такие как вход, выход, переключение на любой интерфейс и т. д. Большинство функций кнопок реализуются следующим образом: кнопки привязываются к событиям, чтобы реализовать их функции; кнопки создаются в панели иерархии (UI > Button), определяется закрытый метод OnClick(), и в методе Start() добавляется «прослушиватель событий» (щелчка мыши или манипулятора), передавая OnClick в качестве параметра объекту Button для привязки ClickHandler.

После создания и отладки всего содержимого виртуальной среды следует добавить шлем виртуальной реальности и контроллеры для создания истинного погружающего эффекта для пользователя. После запуска сцены определяется начальное положение пользователя путем регулировки позиции OVRPlayerController.

Заключение

1. Интеграция анатомического наблюдения восьми систем человеческого тела и демонстрации формы органов позволила реализовать цифровое и трехмерное представление анатомии человека. В процессе разработки системы выявлен ряд проблем и задач, вытекающих из вариантов решения. Среди главных – высокая стоимость устройств виртуальной реальности и необходимость специальной аппаратной поддержки, что ограничивает распространение и продвижение

систем виртуальной реальности в учреждениях образования, а также в личном пользовании. Найденное и опробованное решение этих проблем – наложение ограничений на требования к производительности компьютера и разрешения изображений в системе. Далее – вопрос точности и реалистичности моделей. Неточность в отображении анатомических структур влияет на пользовательский опыт и эффективность обучения. Также среди проблем следует отметить необходимость обновления и поддержки контента. Анатомические модели и методическое сопровождение системы требуют постоянного обновления и поддержки, чтобы они оставались согласованными с актуальными медицинскими знаниями. Это требует значительных затрат времени и человеческих ресурсов и может увеличить затраты на поддержание работоспособности системы на этапе ее использования.

2. Несмотря на указанные проблемы, предложенная реализация виртуальной учебной анатомической лаборатории имеет потенциал применения и перспективы развития как обучающей системы. Кроме того, на ней можно отрабатывать подходы к решению вышеописанных проблем и к проведению различных тестов ее эффективности в реальном обучении.

3. Будущие исследования должны сосредоточиться на решении текущих проблем и задач совершенствования системы, на постоянном улучшении и расширении ее функциональности и производительности, чтобы соответствовать потребностям медицинского образования и клинической практики.

Список литературы / References

1. Hua J., Zhang B., Wang D. (2019) Application of Virtual Reality Technology in Library Visual Information Retrieval. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 569. DOI: 10.1088/1757-899X/569/3/032062.
2. Ivanova A. V. (2018) VR & AR Technologies: Opportunities and Application Obstacles. *Strategic Decisions and Risk Management*. (3), 88–107. <https://doi.org/10.17747/2078-8886-2018-3-88-107> (in Russian).
3. Slavin O. A., Grin E. C. (2019) Overview of Virtual and Augmented Reality Technology. *Proceedings of the Institute for Systems Analysis Russian Academy of Sciences*. Available: <http://www.isa.ru/proceedings/images/documents/2019-69-3/42-54.pdf>.
4. Honey M. L. L., Diener S., Connor K., Veltman M., Bodily D. (2009) Teaching in Virtual Space: Second Life Simulation for Haemorrhage Management. *Proceedings Ascilite Auckland*. 1222–1224.
5. Riener R., Harders M. (2012) *Virtual Reality in Medicine*. London, Springer-Verlag. DOI: 10.1007/978-1-4471-4011-5_1.
6. Kouijzer M. M. T. E., Kip H., Bouman Y. H. A., Kelders S. M. (2023) Implementation of Virtual Reality in Healthcare: A Scoping Review on the Implementation Process of Virtual Reality in Various Healthcare Settings. *Implement Sci Commun.*, Jun. 16. 4 (1). DOI: 10.1186/s43058-023-00442-2.
7. Zhu T. (2019) *Research on the Application of Human-Computer Interaction Interface Based on VR Technology*. China, Southeast University.
8. Bouknight W. J. (1970) A Procedure for Generation of Three-Dimensional Half-Toned Computer Graphics Presentations. *Communications of the ACM*. 13 (9), 527–536.
9. Fuchs H., Levoy M., Pizer S. M. (1989) Interactive Visualization of 3D Medical Data. *Computer*. 22 (8).
10. Nieder G. L., Scott J. N., Anderson M. D. (2000) Using QuickTime Virtual Reality Objects in Computer-Assisted Instruction of Gross Anatomy: Yorick – the VR Skull. *Clinical Anatomy*. 13 (4), 287–293.
11. Izard S. G., Torres R. S., Plaza O. A., Méndez J. A. J., García-Peñalvo F. J. (2000) Nextmed: Automatic Segmentation, 3D Reconstruction, and 3D Model Visualization Platform Using Augmented and Virtual Reality. *Sensors*. 20 (10).
12. Proykova A. (2021) Virtual Science Laboratories: Will They Replace the Physical Laboratories. *The Twelfth International Conference on e-Learning*. Belgrade, Belgrade Metropolitan University.
13. Calhoun P. S., Kuszyk B. S., Heath D. G., Carley J. C., Fishman E. K. (1999) Three-Dimensional Volume Rendering of Spiral CT Data: Theory and Method. *Radiographics*. 19 (3), 745–764.
14. Rezk-Salama C. (2003) Volume Rendering Techniques for General-Purpose Graphics Hardware (Deutsche Kurzfassung). *Ausgezeichnete Informatikdissertationen*.
15. Dai P., Li Z., Zhang Y., Liu S., Zeng B. (2020) PBR-Net: Imitating Physically Based Rendering Using Deep Neural Network. *IEEE Transactions on Image Processing*. 29, 5980–5992.
16. Uechi J., Tsuji Y., Konno M., Hayashi K., Shibata T., Nakayama E., et al. (2015) Generation of Virtual Models for Planning Orthognathic Surgery Using a Modified Multimodal Image Fusion Technique. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*. 44 (4), 462–469.
17. Hameduh T., Haddad Y., Adam V., Heger Z. (2020) Homology Modeling in the Time of Collective and Artificial Intelligence. *Computational and Structural Biotechnology Journal*. 18, 3494–3506.

18. Hu X. (2009) Virtual Reality Technology Fundamentals and Applications. *Beijing University of Posts and Telecommunications Press*.
19. Adobe Inc. (2024) Adobe Audition Release Notes. *Adobe Inc. Retrieved Sept. 15*. Available: <https://helpx.adobe.com/audition/audition-releasenotes.html>.
20. Adobe Inc. (2024) Adobe Premiere Pro System Requirements. *Adobe Inc. Retrieved March 6, 2025*. Available: <https://helpx.adobe.com/premiere-pro/system-requirements.html>.
21. Zhang Qian, Wang Ke, Zhou Sheng (2020) Application and Practice of VR Virtual Education Platform in Improving the Quality and Ability of College Students. *IEEE Access*. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3019262.
22. Ellaway R. H. (2010) Virtual Reality in Medical Education. *Medical Teacher*. 32 (9), 791–793.
23. Ways of Unity UGUI Event Binding. (n.d.). *Retrieved October 7, 2020*. Available: <https://blog.csdn.net/xinzhilinger/article/details/108434303>.
24. Saleeb N., Dafoulas G. (2010). Effect of Student Emotion-Associations on Architectural Color Design of Educational Spaces in 3D Virtual Learning Environments. *20th International Conference on Computer Theory and Applications*.
25. LaViola Jr. J., Kruijff E., McMahan R., Bowman D., Poupyrev I. (2017) 3D User Interfaces: Theory and Practice. *Addison-Wesley Professional*.

Поступила 12.05.2025

Принята в печать 01.07.2025

Доступна на сайте 10.10.2025

Received: 12 May 2025

Accepted: 1 July 2025

Available on the website: 10 October 2025

Вклад авторов

Шан Вэньли провела литературный обзор и анализ литературных данных, осуществила разработку модели и подготовила рукопись статьи.

Козлова Е. И. разработала концепцию и провела критический анализ содержания статьи, подготовила окончательный вариант для публикации.

Authors' contribution

Shang Wenli conducted a literature review and analysis of literature data, developed the model and prepared the manuscript of the article.

Kozlova E. I. developed the concept and conducted a critical analysis of the content of the article, prepared the final version for publication.

Сведения об авторах

Шан Вэньли, асп., Белорусский государственный университет

Козлова Е. И., канд. физ.-мат. наук, доц., зав. каф. интеллектуальных систем, Белорусский государственный университет

Адрес для корреспонденции

220000, Республика Беларусь,
Минск, ул. Курчатова, 5
Белорусский государственный университет
Тел.: +375 25 703-12-23
E-mail: wenlishang128@gmail.com
Шан Вэньли

Information about the authors

Shang Wenli, Postgraduate, Belarusian State University

Kozlova E. I., Cand. Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor, Head of the Department of the Intelligent Systems, Belarusian State University

Address for correspondence

220000, Republic of Belarus,
Minsk, Kurchatova St., 5
Belarusian State University
Tel.: +375 25 703-12-23
E-mail: wenlishang128@gmail.com
Shang Wenli