

УДК 004.9:004.94:355.45

DOI: [10.26102/2310-6018/2026.56.5.014](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2026.56.5.014)

Иммерсивная тренажерная система стрелковой подготовки: архитектура, программно-аппаратная реализация и метрики эффективности

А.Г. Кравец^{1,2}, П.Д. Коробкин²✉

¹Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Российская Федерация

²Государственный университет «Дубна», Дубна, Российская Федерация

Резюме. В работе предлагается иммерсивная тренажерная система на основе технологий расширенной реальности, ориентированная на подготовку сотрудников правоохранительных органов в безопасной виртуальной среде. Актуальность исследования связана с высоким уровнем травматизма при проведении боевой учебы, значительными затратами на боеприпасы и материально-техническое обеспечение, а также необходимостью масштабируемых цифровых решений для массового обучения. Разработанный прототип включает контроллер в форме винтовки с имитацией отдачи, дымового эффекта и запаха пороха, мультизональный тактильный жилет, модуль визуализации, а также программно-аппаратный контур обмена данными по протоколу HTTP в формате JSON. Описана архитектура системы, алгоритмы взаимодействия модулей и заложенные механизмы масштабирования, включающие переход к двунаправленной передаче данных на основе WebSocket и поддержку многопользовательских тренировочных сценариев. Показаны научная новизна решения, заключающаяся в сочетании многоуровневой мультисенсорной имитации выстрела с открытым интерфейсом интеграции в XR-среду, а также практическая значимость для российских силовых ведомств за счет адаптации к типовым учебным задачам, анализу боевой телеметрии и возможности включения модулей искусственного интеллекта для интеллектуальной поддержки тренировки.

Ключевые слова: технологии расширенной реальности, виртуальная и дополненная реальность, иммерсивное обучение, тренажер для силовых ведомств, контроллер стрелкового оружия, тактильный жилет с обратной связью, одноплатный микрокомпьютер, боевая подготовка, мультисенсорная симуляция.

Для цитирования: Кравец А.Г., Коробкин П.Д. Иммерсивная тренажерная система стрелковой подготовки: архитектура, программно-аппаратная реализация и метрики эффективности. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2026;14(5). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/article?id=2297> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.56.5.014

Immersive firearms training system: architecture, hardware-software implementation, and performance metrics

A.G. Kravets^{1,2}, P.D. Korobkin²✉

¹Volgograd State Technical University, Volgograd, the Russian Federation

²Dubna State University, Dubna, the Russian Federation

Abstract. An immersive training system based on extended reality (XR) technologies is proposed to provide safe virtual environments for training law enforcement personnel. The relevance of the study stems from the high injury rates associated with live-fire exercises, substantial expenditure on ammunition and logistics, and the need for scalable digital solutions for large-scale training. The developed prototype comprises a rifle-shaped controller with recoil, smoke, and gunpowder-scent simulation, a multi-zone haptic vest, a visualization module, and a hardware-software data exchange

loop using the HTTP protocol with JSON messages. The paper describes the system architecture, module interaction algorithms, and built-in scaling mechanisms, including migration to bidirectional WebSocket communication and support for multi-user training scenarios. The study highlights the scientific novelty of combining multi-level multisensory shot simulation with an open integration interface for XR environments, as well as the practical significance for Russian security agencies through adaptation to typical training scenarios, analysis of combat telemetry, and the potential inclusion of artificial-intelligence modules for intelligent training support.

Keywords: extended reality technologies, virtual and augmented reality, immersive learning, law enforcement training simulator, firearm controller, haptic feedback vest, single-board microcomputer, combat training, multisensory simulation.

For citation: Kravets A.G., Korobkin P.D. Immersive firearms training system: architecture, hardware-software implementation, and performance metrics. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2026;14(5). (In Russ.). 2026;14(5). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/article?id=2297> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.56.5.014

Введение

Современные реалии предъявляют высокие требования к подготовке сотрудников силовых структур, однако традиционные методы обучения, включая боевые стрельбы и тактические учения, по-прежнему сопряжены с высоким риском травматизма. Согласно отчету МЧС России за 2020 год, было зафиксировано 1132 несчастных случая на производстве, из них 1016 пришлось на военнослужащих. По данным исследования Евдокимова В.И. и соавторов, около 17,4 % травм у военнослужащих по контракту приходится именно на мероприятия, связанные с боевой подготовкой (Рисунок 1), что подчеркивает ее травмоопасность даже в мирное время. Эти данные указывают на системные проблемы: несоблюдение техники безопасности, недостаточную осведомленность личного состава, пробелы в действующих методиках подготовки.

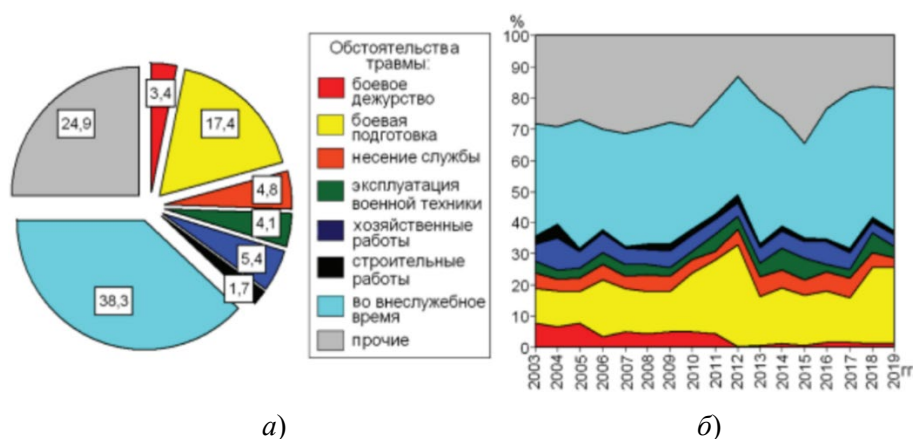


Рисунок 1 – Обстоятельства получения травм у военнослужащих по контракту ВС России:
а – динамика; б – структура

Figure 1 – Circumstances of injuries to contract servicemen of the Russian Armed Forces:
а – dynamics; б – structure

К числу структурных ограничений традиционного обучения относится и зависимость от территориальных условий. Доступность полигонов, климат, логистика – все это существенно усложняет организацию регулярных тренировок.

Перспективным ответом на эти вызовы становятся XR-технологии. Они позволяют снизить финансовые затраты, минимизировать травматизм и сделать процесс обучения более гибким. Под термином XR объединяют три направления: виртуальную,

дополненную и смешанную реальность. Накопленный к настоящему времени исследовательский опыт свидетельствует об их значительном потенциале в сфере профессиональной подготовки [2, 3].

Ведущие исследования подтверждают, что обучение с применением технологий XR позволяет усваивать материал в четыре раза быстрее по сравнению с традиционными аудиторными занятиями, а экономия затрат при масштабировании достигает 52 % [3, 4]. Крупнейшие технологические корпорации активно инвестируют в данное направление: Microsoft заключила контракт на поставку систем дополненной реальности для армии США стоимостью до 22 млрд долларов, Sony вложила около 2,2 млрд долларов в разработку игровых систем виртуальной реальности.

В области тренажеров для силовых структур лидирующие позиции занимают VirTra Systems (США) и Thales Group (Франция). VirTra предлагает многогранные симуляторы серии V-300, обеспечивающие 300-градусное погружение для отработки действий в кризисных ситуациях. Thales разрабатывает комплексные решения для подготовки персонала сухопутных войск, авиации и флота. Вместе с тем указанные системы экономически недоступны для широкого применения в условиях российских ведомств.

Патентный анализ выявил существенные ограничения существующих технических решений [5, 6]. Патент US 7 306 462 B2 компании Meggitt/InVeris обеспечивает газовую имитацию отдачи, однако требует регулярной заправки баллонов и лишен мультисенсорной обратной связи. В патенте US 5 215 462 A представлен симулятор оружия, в котором не реализована функция пространственного трекинга. В свою очередь, заявка US 2024/0068782 A1 описывает навесное размещение датчиков на стволе, однако эффект отдачи в данном решении обеспечивается только за счет маломощного вибрационного мотора. Аналог по заявке US 2022/0114905 A1 сфокусирован на тренировке навыков мирного урегулирования конфликтов для сотрудников полиции и не предполагает достоверного воспроизведения процесса стрельбы.

Таким образом, на сегодняшний день отсутствуют открытые мультисенсорные комплексы, способные комплексно и синхронно имитировать отдачу, дым, запах.

Цель исследования – создание XR-тренажера, позволяющего формировать реалистичную боевую среду для повышения эффективности тактико-огневой подготовки сотрудников правоохранительных органов.

Задачи исследования:

1. Спроектировать аппаратный контроллер, имитирующий огнестрельное оружие, с модулями достоверной физической отдачи и выпуска парового следа.
2. Создать прототип многосекционного тактильного жилета с адресной симуляцией попаданий.
3. Спроектировать интерфейс пользователя и обеспечить сбор данных о пользовательском опыте.
4. Реализовать аппаратную и программную интеграцию всех компонентов тренажера.

Материалы и методы

Тренажер представляет собой аппаратно-программный комплекс, объединяющий следующие компоненты: контроллер-автомат с мультисенсорной обратной связью, многосекционный тактильный жилет, систему визуализации (гарнитура виртуальной реальности или монитор), ножную педаль перемещения и центральный блок управления. Концептуальная схема взаимодействия этих компонентов представлена на Рисунке 2 [2].

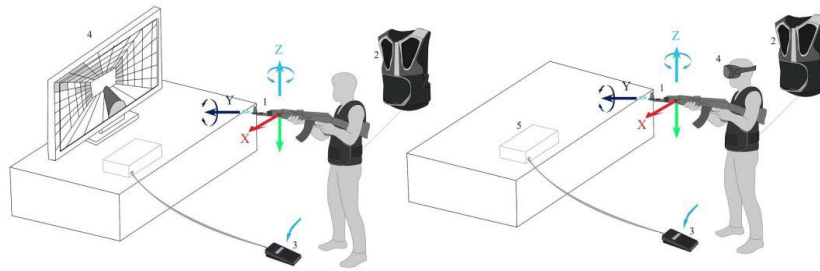


Рисунок 2 – Концептуальная схема XR-тренажера
Figure 2 – Conceptual scheme of the XR-simulator

Взаимодействие компонентов реализовано по беспроводному каналу с использованием протокола передачи гипертекста и структурированного формата обмена данными, что обеспечивает синхронизацию всех тактильных и визуальных эффектов в режиме реального времени.

Для проектирования системы применялась методология структурно-функционального моделирования IDEF0. На Рисунке 3 представлена детализированная декомпозиция подсистем тренажера, отражающая основные функции тренажера и их входы/выходы.

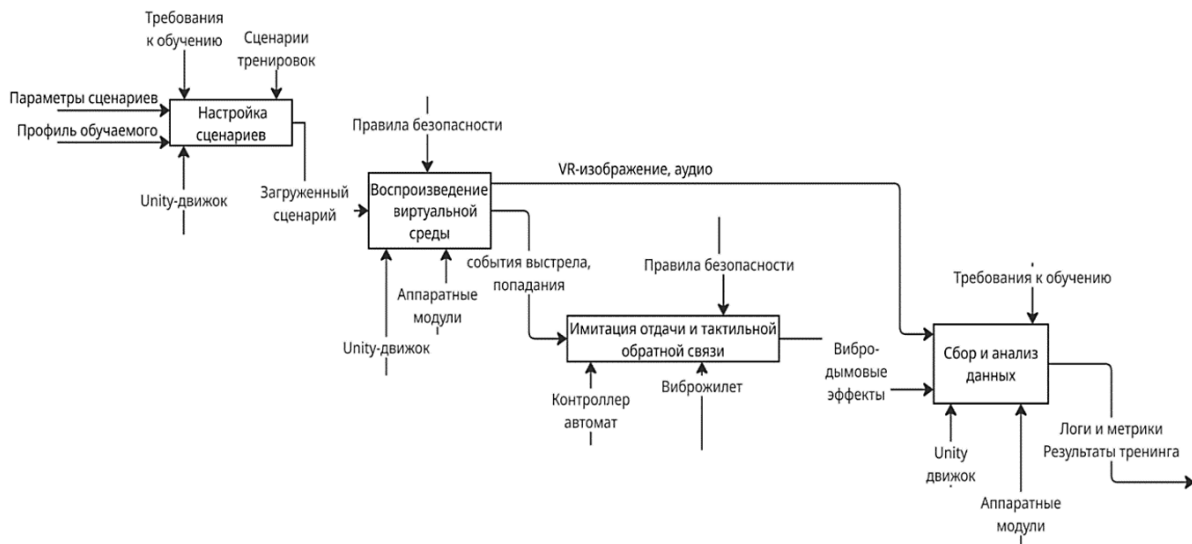


Рисунок 3 – Структурно-функциональная модель XR-тренажера
Figure 3 – Structural and functional model of the XR-simulator

Анализ вариантов использования позволил выделить функции для трех ролей: системного администратора, инструктора и конечного пользователя (Рисунок 4).

Ключевым устройством служит многофункциональный контроллер-автомат – макет стрелкового оружия для использования в среде расширенной реальности [7]. Архитектура контроллера включает:

- 1) вибромотор в прикладе для реализации кинестетической отдачи [5, 8];
- 2) парогенератор под стволом;
- 3) инерциальный измерительный модуль;
- 4) механический концевой выключатель в качестве спускового механизма;
- 5) литий-ионный аккумулятор.

Логические связи между контроллером-автоматом, тактильным жилетом, системой визуализации и сервером XR-сцены представлены в виде сетевого графа (Рисунок 5).

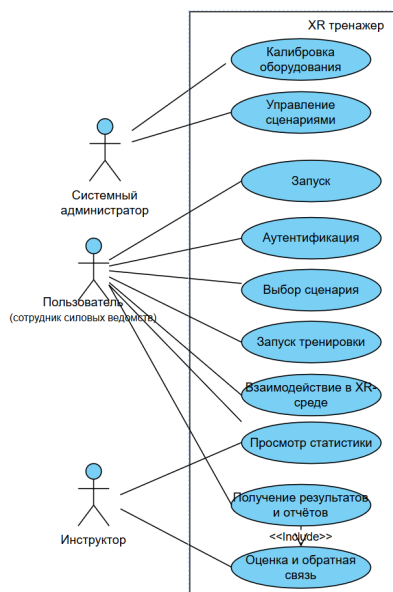


Рисунок 4 – Диаграмма вариантов использования XR-тренажера с учетом ролей администратора, пользователя и инструктора
Figure 4 – Use-Case diagram of the XR trainer considering the roles of administrator, user, and instructor



Рисунок 5 – Структурная схема соединений системы XR-тренажера в виде сетевого графа
Figure 5 – Structural diagram of the system connections for the XR-simulator in the form of a network graph

Для выбора вычислительной платформы применялся метод сравнительного анализа: оценивались микроконтроллерные решения на базе Arduino Nano и ESP32 с реле и одноплатный микрокомпьютер Raspberry Pi 5. По результатам сравнительного анализа выбран одноплатный микрокомпьютер Raspberry Pi 5 как платформа с полноценной операционной системой Linux, высокой производительностью и поддержкой широкого спектра интерфейсов, критически необходимых для интеграции с XR-сценами и параллельной обработки данных в реальном времени. Несмотря на более высокую стоимость по сравнению с микроконтроллерами Arduino Nano или ESP32, данная платформа обеспечивает необходимый уровень масштабируемости. В перспективе планируется переход на отечественные аналоги.

Обработка событий (выстрел, перезарядка, взвод) осуществляется одноплатным микрокомпьютером Raspberry Pi 5, который формирует события, упаковывает их в структурированный формат и передает по беспроводному протоколу на хост расширенной реальности.

Аппаратная реализация многосекционного тактильного жилета с независимым управлением вибромоторами в каждой зоне [5] показана на Рисунке 6. На схеме отображено подключение вибродрайверов к блоку управления и литиевому аккумулятору. Двухнаправленная стрелка показывает направление передачи сигнала от блока управления к внешнему симулятору.

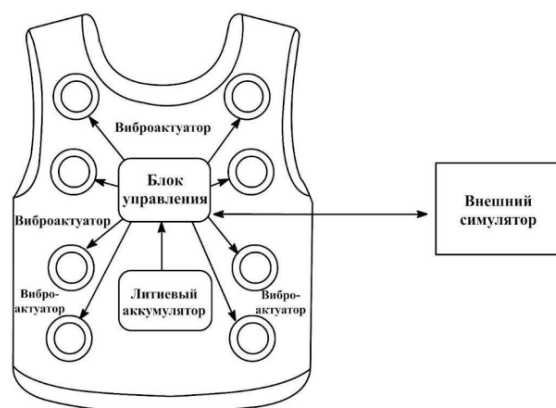


Рисунок 6 – Схема устройства виброжилета
Figure 6 – Schematic diagram of the vibro vest device

Сигналы о виртуальном попадании передаются по беспроводному каналу Wi-Fi в формате JSON, содержащем идентификатор зоны воздействия, после чего система активирует соответствующие секции, создавая ощущение точечного тактильного удара.

Результаты

В результате проведенного исследования реализован рабочий прототип контроллера-автомата. Устройство обеспечивает синхронную активацию виброотдачи и генерацию парового облака при каждом нажатии на спусковой крючок с передачей данных ориентации по беспроводному каналу.

Кроме того, был разработан и реализован многосекционный тактильный жилет с независимым управлением каждой зоны. Жилет выполнен в форм-факторе бронежилета, привычного личного составу силовых ведомств, что обеспечивает адресную обратную связь при получении виртуального попадания с точностью до секции тела.

Разработана функциональная модель верхнего уровня и ее детализированная декомпозиция, отражающие этапы работы системы: настройка сценария, воспроизведение виртуальной среды, отслеживание событий (выстрел, попадание), активация сенсорных эффектов и сбор итоговой аналитики. Разработаны диаграммы вариантов использования для ролей пользователя, инструктора и системного администратора.

Полученные результаты демонстрируют, что разработанный прототип устраняет ключевой недостаток существующих решений – отсутствие интегрированной мультисенсорной обратной связи в рамках единого открытого устройства [2]. В отличие от патентных решений таких компаний, как InVeris (газовая отдача без дыма и запаха), ForceTube и Striker VR (только вибрационная отдача), предложенный контроллер одновременно реализует виброотдачу, дымовой и обонятельный эффекты. Подобная комбинация стимулов, по данным нейрофизиологических исследований, вызывает физиологические реакции, характерные для реальных боевых условий – учащенное сердцебиение и сокращение времени реакции [4, 9], что создает благоприятные условия для развития устойчивых двигательных навыков и стрессоустойчивости.

Сравнительный анализ разработанного прототипа с коммерческими аналогами по ключевым критериям представлен в Таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение характеристик прототипа и коммерческих аналогов
Table 1 – Comparison of the characteristics of the prototype and commercial analogues

Критерий	Разработанный XR-тренажер	VirTra V-300	InVeris BlueFire
Имитация отдачи	Вибромотор	Специализированный механизм	Газовая (CO ₂)
Дымовой эффект	Парогенератор	Отсутствует	Отсутствует
Обонятельный эффект	Ароматизатор	Отсутствует	Отсутствует
Архитектура	Открытая (беспроводной протокол/JSON)	Закрытая	Закрытая
Мобильность	Высокая	Стационарная	Ограниченная
Ориентировочная стоимость	Низкая	Высокая	Высокая

Использование открытых стандартных протоколов передачи данных обеспечивает принципиальное преимущество перед закрытыми фирменными системами VirTra и Thales: совместимость с произвольным игровым движком или XR-платформой без привязки к конкретному поставщику программного обеспечения. Это снижает совокупную стоимость владения и упрощает настройку тренировочных сценариев под конкретные задачи. Применение доступной элементной базы обеспечивает низкую стоимость прототипа относительно зарубежных коммерческих аналогов, а компактное конструктивное исполнение обеспечивает высокую мобильность системы в сравнении со стационарными комплексами.

Вместе с тем исследование имеет ряд ограничений [10]. Текущий прототип требует улучшения эргономики и оптимизации энергопотребления для обеспечения длительного автономного использования. Требуется проведение полноценного испытания с участием реальных сотрудников силовых ведомств для валидации образовательной эффективности. Кроме того, применение одноплатного микрокомпьютера Raspberry Pi как зарубежного компонента требует в перспективе замены на отечественные аналоги.

Перспективы масштабирования включают интеграцию модулей виртуальных гранатометов и очков дополненной реальности, внедрение искусственного интеллекта в виртуальную тренировочную среду, реализацию многопользовательских сетевых режимов и анализ боевой телеметрии. Коммерциализация предполагает патентную защиту уникальных технических решений – конструкции вибродрайверов жилета, интеграции парогенератора и метода синхронизации сенсоров.

Заключение

В ходе исследования разработана и реализована концепция иммерсивного тренажера на основе технологий расширенной реальности для профессиональной подготовки сотрудников силовых ведомств. Создан работоспособный прототип, включающий многофункциональный контроллер в форме стрелкового оружия с синхронной мультисенсорной имитацией стрельбы (виброотдача, паровое облако, ароматический эффект) и многосекционный тактильный жилет с адресной обратной связью. Реализован открытый беспроводной интерфейс взаимодействия, обеспечивающий интеграцию с любыми платформами расширенной реальности.

Основные выводы:

1. Разработанный тренажер устраняет выявленные ограничения существующих аналогов и обеспечивает более низкую стоимость, высокую мобильность и

мультисенсорную обратную связь.

2. Открытая программная архитектура создает конкурентное преимущество перед закрытыми иностранными системами.

3. Разработанная система соответствует задачам импортозамещения и адаптирована к специфике учебных сценариев российских силовых ведомств.

Приоритетными направлениями дальнейших исследований являются: проведение апробации с участием реальных пользователей [9, 10], оптимизация энергопотребления, переход на отечественную элементную базу, а также расширение функциональности за счет многопользовательских режимов и интеграции систем искусственного интеллекта.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Евдокимов В.И., Сивашченко П.П., Иванов В.В., Хомянец В.В. Медико-статистические показатели травм у военнослужащих контрактной службы (рядовых, сержантов и старшин) Вооруженных Сил Российской Федерации (2003–2019 гг.). *Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях*. 2020;(4):87–104. <https://doi.org/10.25016/2541-7487-2020-0-4-87-104>
Evdokimov V.I., Sivashchenko P.P., Ivanov V.V., Khominets V.V. Medical and statistical indicators of injuries among contract military personnel (privates, sergeants and foreman) in the Armed Forces of the Russian Federation (2003–2019). *Medico-Biological and Socio-Psychological Problems of Safety in Emergency Situations*. 2020;(4):87–104. (In Russ.). <https://doi.org/10.25016/2541-7487-2020-0-4-87-104>
2. Kravets A.G., Korobkin P.D. Immersive XR System for Law-Enforcement Personnel Training. In: *Creativity in Intelligent Technologies and Data Science: 6th International Conference (CIT&DS 2025), 22–25 September 2025, Volgograd, Russia*. Cham: Springer; 2026. P. 219–235. https://doi.org/10.1007/978-3-032-14674-8_14
3. Podoletz L., McGill M., McIlhatton D., et al. A Critical Review of Virtual and Extended Reality Immersive Police Training: Application Areas, Benefits & Vulnerabilities. In: *VRST '24: Proceedings of the 30th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, 09–11 October 2024, Trier, Germany*. New York: ACM; 2024. <https://doi.org/10.1145/3641825.3687707>
4. Kent J.A., Hughes Ch.E. Law enforcement training using simulation for locally customized encounters. *Frontiers in Virtual Reality*. 2022;3. <https://doi.org/10.3389/frvir.2022.960146>
5. Bayro A., Havens B., Jeong H. XR Vest: A Novel System for Demonstration-Based Learning of Safety Skills. *IEEE Transactions on Learning Technologies*. 2023;17:63–72. <https://doi.org/10.1109/TLT.2023.3260760>
6. Rahimi A., Zhou J., Haghani S. A VR gun controller with Recoil Adjustability. In: *2020 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), 04–06 January 2020, Las Vegas, NV, USA*. IEEE; 2020. <https://doi.org/10.1109/ICCE46568.2020.9043008>
7. Kravets A.G., Pavlenko I.D., Egunov V.A., Kravets E. Interaction with virtual objects in VR-applications. In: *Creativity in Intelligent Technologies and Data Science: 5th International Conference (CIT&DS 2023), 11–15 September 2023, Volgograd, Russia*. Cham: Springer; 2023. P. 433–449. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44615-3_30
8. Komori Sh., Ishikawa T. A Research on a Feedback Device to Represent Gun Recoil in a Virtual Reality Game. In: *ICVARS '14: 8th International Conference on Virtual and Augmented Reality Simulations, 14–16 March 2024, Melbourne, Australia*. New York: ACM; 2024. <https://doi.org/10.1145/3657547.3657553>
9. Muñoz J.E., Quintero L., Stephens Ch.L., Pope A.T. A Psychophysiological Model of

- Firearms Training in Police Officers: A Virtual Reality Experiment for Biocybernetic Adaptation. *Frontiers in Psychology*. 2020;11. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.00683>
10. Stubbs G. Addressing the potential for training scars: investigating the risk of using Extended Reality in police training. *Policing: A Journal of Policy and Practice*. 2025;19. <https://doi.org/10.1093/police/paaf019>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Кравец Алла Григорьевна, доктор технических наук, профессор, Волгоградский государственный технический университет, Волгоград; Государственный университет «Дубна», Дубна, Российская Федерация.

e-mail: allagkravets@yandex.ru

ORCID: [0000-0003-1675-8652](https://orcid.org/0000-0003-1675-8652)

Alla G. Kravets, Candidate of Engineering Sciences, Professor, Volgograd State Technical University, Volgograd; Dubna State University, Dubna, the Russian Federation.

Коробкин Павел Дмитриевич, магистрант, Государственный университет «Дубна», Дубна, Российская Федерация.

e-mail: kpd.20@uni-dubna.ru

Pavel D. Korobkin, Master's Degree student, Dubna State University, Dubna, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 30.03.2026; одобрена после рецензирования 15.05.2026; принята к публикации 23.05.2026.

The article was submitted 30.03.2026; approved after reviewing 15.05.2026; accepted for publication 23.05.2026.