

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

EDN: <https://elibrary.ru/xjhmcc>DOI: <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2023-63-11-715-722>

УДК 004.946:613.6.02

© Коллектив авторов, 2023

Глухов Д.В.¹, Калинина С.А.¹, Меркулова А.Г.^{1,2}**Особенности влияния технологий виртуальной реальности на состояние здоровья работников**¹ФГБНУ «Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова», пр-т Будённого, 31, Москва, 105275;²ФГАОУ ВО «Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова» Минздрава России (Сеченовский университет), ул. Трубецкая, 8/2, Москва, 119991

Представлен обзор исследований по влиянию виртуальной реальности на функциональное состояние и здоровье человека. Актуальность работы обусловлена ростом интереса к использованию VR-технологий в промышленности, образовательном процессе, в медицине и других областях. При этом известно, что различные побочные эффекты испытывают более 80% пользователей.

С целью изучения особенностей воздействия на организм человека негативных эффектов нахождения в виртуальной среде проанализированы более 60 зарубежных литературных источников.

Проведённый анализ научных публикаций показал, что большинство из них посвящено изучению киберболезни, хотя исследователи отмечают и другие негативные симптомы и эффекты, вызванные виртуальной реальностью: зрительное и мышечное утомление, острый стресс и умственное переутомление. Выделены три группы факторов, влияющих на развитие побочных эффектов: индивидуальные, факторы аппаратного и программного обеспечения. Установлено, что наибольшее влияние на состояние пользователя оказывают характеристики визуального дисплея.

Недостатком большинства исследований является использование метода анкетирования, а также оценка влияния кратковременной работы в расширенных средах на организм человека. Рассмотренные в данной статье вопросы формируют направления для дальнейших исследований в области взаимодействия человека и виртуальной среды.

Ключевые слова: виртуальная реальность; дополненная реальность; VR/AR; киберболезнь

Для цитирования: Глухов Д.В., Калинина С.А., Меркулова А.Г. Особенности влияния технологий виртуальной реальности на состояние здоровья работников. *Мед. труда и пром. экол.* 2023; 63(11): 715–722. <https://elibrary.ru/xjhmcc> <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2023-63-11-715-722>

Для корреспонденции: Глухов Дмитрий Валерьевич, глав. науч. сотр. лаб. физиологии труда и профилактической эргономики ФГБНУ «НИИ МТ», д-р мед. наук. E-mail: d.gluhov@iriioh.ru

Участие авторов:

Глухов Д.В. — редактирование;

Калинина С.А. — сбор материала, написание текста;

Меркулова А.Г. — сбор материала, написание текста.

Все авторы — утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи, концепция исследования.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Работа не имела спонсорской поддержки.

Дата поступления: 11.09.2023 / Дата принятия к печати: 30.10.2023 / Дата публикации: 15.12.2023

Dmitrij V. Glukhov¹, Svetlana A. Kalinina¹, Anastasiya G. Merkulova^{1,2}**The impact of virtual reality technologies on the health of employees**¹Izmerov Research Institute of Occupational Health, 31, Budyonnogo Ave., Moscow, 105275;²I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University), 8/2, Trubetskaya St., Moscow, 119991

The article is a review of research on the impact of virtual reality on the functional state and human health. The relevance of the work is due to the growing interest in the use of virtual reality technologies in industry, education, medicine and other fields. At the same time, it is known that more than 80% of users have various side effects.

The authors have analyzed more than 60 foreign literary sources in order to study the peculiarities of the negative effects of being in a virtual environment on human organisms.

An analysis of scientific publications has shown that most of them are devoted to the study of cyber sickness, although researchers note other negative symptoms and effects caused by virtual reality: visual and muscle fatigue, acute stress and mental fatigue. We identified three groups of factors influencing the development of side effects: individual, hardware and software factors, and found that the characteristics of the visual display have the greatest impact on the user's condition.

The disadvantage of most studies is the use of the questionnaire method, as well as the assessment of the impact of short-term work in extended environments on the human body.

The issues discussed in this article form the directions for further research in the field of human interaction and the virtual environment.

Keywords: virtual reality; augmented reality; virtual reality-induced symptoms and effects (VR/AR); cybersickness

For citation: Glukhov D.V., Kalinina S.A., Merkulova A.G. The impact of virtual reality technologies on the health of employees. *Med. труда и пром. экол.* 2023; 63(11): 715–722. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2023-63-11-715-722> <https://elibrary.ru/xjhmcc> (in Russian)

For correspondence: Dmitry V. Glukhov, the chief researcher at physiology of labor and preventive ergonomics laboratory, Izmerov Research Institute of Occupational Health, Dr. of Sci. (Med.). E-mail: d.gluhov@iriioh.ru

Author IDs Glukhov D.V. <https://orcid.org/0000-0001-5704-0650>
Kalinina S.A. <https://orcid.org/0000-0002-4603-8034>
Merkulova A.G. <https://orcid.org/0000-0002-0180-5754>

Contribution:

Glukhov D.V. — editing;

Kalinina S.A. — collecting material, writing the text;

Merkulova A.G. — collecting material, writing the text.

All authors — approval of the final version of the article, responsibility for the integrity of all parts of the article, the concept of the study.

Funding. The work had no funding.

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

Received: 11.09.2023 / Accepted: 30.10.2023 / Published: 15.12.2023

Четвёртая промышленная революция (Индустрия 4.0) способствует интенсивному внедрению XR-технологий в производство и обслуживание человеческих потребностей, включая быт, труд и досуг. Многочисленные исследования в сферах образования [1], маркетинга [2] и развлечений [3] показали, что использование данных технологий улучшает процесс обучения [4], в том числе и для студентов с ограниченными интеллектуальными возможностями [5], способствует развитию навыков сотрудничества [6], повышает креативность и вовлечённость в деятельность [7].

Виртуальные учебные среды способствуют приобретению знаний и облегчению процесса обучения, а также направлены на освоение различных ноу-хау и формирование навыков. За последние годы разработано множество приложений и сценариев для XR-систем, облегчающих работу со сложными и абстрактными концепциями в таких областях науки, как математика, физика, астрономия, биология, химия и экономика [8].

Виртуальные среды для практического обучения широко используются профессиональными сообществами в различных сферах (военная подготовка [9], обучение сотрудников правоохранительных органов быстрому реагированию в условиях экстренных ситуаций [10], инженерная подготовка [11], пожаротушение [12], моделирование стыковок космического корабля к станции [13] и др.). Повсеместно разрабатываются платформы обучения по охране труда на производстве при помощи VR-технологий: на занятиях работники отрабатывают действия в опасных и нестандартных ситуациях без ущерба для собственного здоровья [14, 15].

Крупные компании, такие как *Siemens*, *Daimler Mercedes*, *Saarlstahl*, *Volkswagen*, *Man*, *Liebherr* и *John Deere*, а также центры обучения персонала для повышения эффективности и безопасности труда успешно применяют XR-технологии. Например, в европейских центрах профессиональной подготовки сварщиков применение AR-технологий позволило ускорить время обучения на 17%, сократить количество используемого при обучении материала в среднем на 68%, а число несчастных случаев — на 84% [16].

В автомобильной промышленности (*Volvo*, *Ford*, *Hyundai*) XR-технологии также зарекомендовали себя как полезный инструмент, открывая новые перспективы для подготовки специалистов и оптимизации процессов проектирования и производства, в маркетинге и продажах [17]. Наложение виртуальных моделей на реальные объекты помогает работникам в доступной форме понять, какие действия следует выполнить для замены повреждённого компонента или разбора деталей автомобиля.

Сотрудники HR-отделов виртуальную реальность применяют с целью найма, адаптации, обучения и организации работы персонала. Интерактивность, лежащая в основе VR/AR, позволяет не только оценить компетенции и на-

выки кандидата или сотрудника компании, но и определить его сильные и слабые стороны. Технология позволяет предсказать поведение человека в критической ситуации, его навыки решения проблем на работе и возможность эффективной коммуникации с клиентами или деловыми партнёрами [18, 19].

Работодатели все чаще рассматривают возможность замены привычной работы на ПК на работу в иммерсивной виртуальной среде, например операции с электронными таблицами, чтение, ввод, редактирование и корректура текста, кодирование и поиск информации [20].

Широко применяются XR-технологии не только для обучения медицинского персонала [21, 22], но и для реабилитации пациентов в кардиологии [23], при травмах спинного мозга [24], в интенсивной терапии [25], пульмонологии [26], для упрощения проведения хирургических вмешательств [27]. Современная психиатрия успешно использует виртуальные сценарии для лечения психических расстройств [28], исследования когнитивных функций при шизофрении [29], при работе с людьми, страдающими деменцией [30] и расстройствами аутистического спектра [31].

Стоит отметить, что при нахождении в VR у пользователя создаётся иллюзия восприятия виртуального мира как реального за счёт искусственной стимуляции рецепторов одного или нескольких органов чувств. Подобная стимуляция нарушает работу биологических механизмов и противоречит индивидуальному опыту пользователя. В некоторых случаях организм адаптируется к новым раздражителям, вследствие чего пользователь не замечает недостатков в системе VR. Однако чаще всего реакция организма на нахождение в виртуальной среде негативна.

Таким образом, активное использование систем виртуальной реальности в различных отраслях экономики может привести к увеличению числа случаев негативного влияния данной технологии на здоровье и безопасность работников, что было отмечено Европейским агентством по безопасности и гигиене труда [32]. Поэтому важно изучить и систематизировать знания о потенциальных рисках, связанных с использованием VR на рабочем месте, включая факторы, влияющие на появление негативных симптомов, а также технические и эргономические решения, позволяющие избежать этих эффектов или, по крайней мере, снизить риск их развития или степень воздействия.

Цель работы — анализ особенностей воздействия на организм человека негативных эффектов нахождения в виртуальной среде.

Для проведения литературного обзора авторы статьи сконцентрировались на изучении иностранных публикаций, так как в них представлены актуальные и информативные данные систематических обзоров и мета-анализов по теме влияния VR-технологий на организм человека. Отечественные публикации, в основном, направлены на

применение технологий виртуальной реальности в психолого-педагогических и социально-гуманитарных сферах, подробно рассматриваются философские и этические аспекты их применения. Результаты большого числа работ соответствуют низкому уровню доказательности, исследователи часто в качестве синонимов используют термины «киберболезнь» и «векция», а также не используют комплексный подход при рассмотрении негативных симптомов и эффектов, вызванных виртуальной реальностью.

Поиск литературных источников был проведён в научных базах данных *Scopus* и *Google Scholar*. В качестве поисковых запросов были введены: «виртуальная реальность», «дополненная реальность», «расширенная реальность», «влияние VR на человека/работника/организм», «киберболезнь», «негативные эффекты VR-систем». Повышенное внимание уделялось работам, опубликованным в течение последних 5 лет.

Расширение восприятия реальности посредством цифровых технологий связано с концепцией реально-виртуального континуума. Существуют два полярных варианта возможных реальностей: реальность, в которой мы живём, и виртуальная реальность (*virtual reality*, VR), полностью сгенерированная. Промежуточными звеньями модели являются дополненная реальность, в которой присутствуют виртуальные элементы (*augmented reality*, AR), и дополненная виртуальность с элементами реального мира (*augmented virtuality*, AV) [33]. Вся область континуума между крайними точками называется смешанной реальностью (*mixed reality*, MR). В 2019 г. мировое IT-сообщество приняло к использованию термин «расширенная реальность» (*extended reality*, XR), под которым понимаются все технологии и решения, ранее объединённые определениями виртуальной и дополненной реальности: по мере развития программного и аппаратного обеспечения различия между AR и VR становятся менее значимыми [34].

Негативные эффекты использования XR-систем долгое время препятствовали широкому распространению технологии. Исследователям было сложно охарактеризовать их из-за влияния мешающих факторов, таких как индивидуальные различия пользователей, адаптация к повторному использованию, сложность измерения симптомов и чувствительность к контенту. Достижения в области систем отображения, считывания и иных вычислительных технологий привели к уменьшению неблагоприятных эффектов, тем не менее, на сегодняшний день полностью их избежать невозможно. Стоит отметить, что наиболее выраженные симптомы проявляются при использовании шлемов виртуальной реальности (*head-mounted display*, HMD).

Для обозначения комплекса побочных эффектов исследователи используют определение «симптомы и эффекты, вызванные виртуальной реальностью (*virtual reality-induced symptoms and effects*, VRIFE)», введённое в работе [35], поскольку оно даёт полное представление о разнообразии побочных эффектов VR. Другие авторы предлагают использовать также определение «синдром VR-деадаптации» [36].

Различные побочные эффекты испытывают более 80% пользователей VR. К VRIFE относятся: киберболезнь (VR-болезнь или симуляторная болезнь), зрительное и мышечное утомление, острый стресс и умственное переутомление.

Стоит отметить, что зрительное утомление исследователи рассматривают не только как самостоятельный побочный эффект, но и как симптом киберболезни. Следует

разграничивать эти VRIFE по причине различной этиологии: зрительное утомление развивается вследствие конфликта вергенции-аккомодации (зрительно-проприоцептивного конфликта), а киберболезнь — из-за сенсорных конфликтов при укачивании (зрительно-вестибулярного конфликта). Однако данное утверждение носит дискуссионный характер [20].

Киберболезнь является наиболее изученным состоянием, и это неудивительно: в работе [37] авторы сообщают, что около трети всех пользователей испытывают её симптомы. Физиологические проявления VR-болезни (потливость, тошнота, бледность кожи и учащённое сердцебиение) отражают нейроэндокринную стрессовую реакцию организма [38].

Основными симптомам киберболезни являются [39]:

- тошнота и повышенное слюноотделение: в лёгкой форме могут возникнуть неприятные ощущения в желудке, пищеводе или горле. Увеличение их интенсивности может привести к рвоте. Данный симптом пользователи считают самым дискомфортным;
- головокружение и пространственная дезориентация: пользователи могут ощущать движение по типу вращения или покачивания, даже после прекращения использования VR. Может начаться вертиго, часто связанное с нарушением работы вестибулярного аппарата;
- сонливость: снижается концентрация внимания, появляется зевота, пользователь может заснуть во время нахождения в VR;
- холодный пот: потоотделение, не связанное с повышением температуры окружающей среды;
- бледность: наблюдается побеление или изменение нормального цвета кожи лица, ушей, шеи и груди;
- ощущение тепла и гиперемия: внезапное усиление ощущаемого тепла, похожее на ощущения при лихорадке;
- головная боль: могут возникнуть головные боли, которые постепенно усиливаются и сохраняются долгое время после опыта VR;
- усталость: пользователи могут умственно и физически уставать после длительного опыта VR;
- астенения и нарушение аккомодации: может появиться ощущение усталости глаз, раздражение или боль, а также зрение может стать нечётким или становится трудно сфокусироваться на объекте.

Одним из более редких симптомов киберболезни является синдром Сопита, который тесно связан с сонливостью и включает такие симптомы, такие как лень, отсутствие социальной активности, изменение настроения, апатию и нарушение сна. Другой симптом — нарушение равновесия позы, которое отрицательно сказывается на балансе и координации. Нахождение в VR-среде в устройствах HMD приводит к тому, что пользователям трудно сохранять устойчивое положение при ходьбе. Кроме того, различия в параметрах походки предполагают, что пользователи в виртуальной среде используют непривычный и необычный рисунок походки [40].

Возможна также потеря остроты зрения при движениях головы или тела, что является следствием адаптации вестибуло-окулярного рефлекса к недостаткам системы VR.

Наиболее негативным аспектом киберболезни является то, что в случае интенсивной стимуляции центральной нервной системы её симптомы могут развиваться уже через 5 минут [41]. Большинство пользователей, которые

испытывают симптомы сразу после прекращения опыта виртуальной реальности, продолжают испытывать незначительный дискомфорт в течение получаса. Однако у некоторых пользователей симптоматика VR-болезни может протекать в течение ещё нескольких часов или даже дней после использования VR-системы [42–44]. В соответствии с литературными данными максимальная продолжительность пребывания в виртуальной среде не должна превышать 55–70 минут для предупреждения тяжёлых проявлений VR-болезни [45]. При этом утомление зрительно-го и опорно-двигательного аппаратов могут развиваться за 20 минут [41].

Нахождение в VR-среде приводит также к психофизиологическим и нейрофизиологическим изменениям в организме пользователя, провоцируя существенное снижение скорости реакции и когнитивных функций в целом, изменение температуры тела (в зависимости от условий виртуальной среды) и частоты сердечных сокращений. Кроме того, оно значительно влияет на мозговой кровоток (селективное увеличение перфузии и уменьшение общей мозговой перфузии), увеличивает концентрацию оксигемоглобина в мозговом кровотоке, мощность сигналов ЭЭГ, связи между областями мозга, отвечающими на стимулы, и активность областей мозга, отвечающими за формирование тошноты [45]. Мерцание дисплеев (импульсная зрительная стимуляция) может вызывать устойчивые колебания электрической активности головного мозга на частотах до 90 Гц, причём эффект более выражен в затылочных областях и обратно пропорционален частоте обновления изображения дисплея [46].

Кроме умственного утомления у пользователей VR-сред также может развиваться и физическое утомление из-за интерфейсов, требующих больших мышечных усилий. Например, при использовании режима «песочница» пользователь часто перемещает объекты в пространстве, выполняя реальные движения руками. Это быстро приводит к мышечному утомлению и синдрому «рук гориллы» (*gorilla arm syndrome*), при котором появляется ощущение увеличения веса вытянутых рук [47].

Стоит отметить, что большинство VR-гарнитур имеют массу от 450 до 650 г и спроектированы так, что большая её часть приходится на лицо, что является неэргономичным решением: гарнитура тянет голову вперёд и вниз, создавая дискомфорт в шейном отделе при длительном ношении, а также давит на нос, скулы и лоб [48, 49].

Ещё одной проблемой, связанной с использованием VR-гарнитур, является вопрос гигиены и риск развития дерматологических заболеваний. В гарнитурах обычно используют ткань, поролон и текстильные застёжки, что затрудняет санитарную обработку этих материалов дезинфицирующими средствами [50].

В систему виртуальной реальности входят аппаратное и программное обеспечение, а также сам пользователь, взаимодействующий с оборудованием. Поэтому исследователи выделяют три группы факторов, влияющих на развитие, частоту и тяжесть VR-болезни: индивидуальные, факторы аппаратного и программного обеспечения.

В обзорном исследовании [41] авторы выделили более 90 факторов, влияющих на развитие, частоту и тяжесть VR-болезни, и для каждого из них указали рекомендации по нивелированию его воздействия, а также уровень его доказательности, где уровню I соответствуют данные систематического обзора или мета-анализов всех соответствующих рандомизированных клинических исследований, а VII —

данные, полученные на основании мнения авторитетных лиц и/или отчётов экспертных комитетов [51].

В **таблице** перечислены выделенные факторы для пяти VR-ISE. Стоит отметить, что ни у одного из факторов нет первого уровня доказательности.

В работе [52] перечислены дополнительные индивидуальные факторы развития киберболезни: уровень эмоциональности личности, употребление алкоголя, курение, бессонница, расстройства аутистического спектра, рассеянный склероз, возрастная макулярная дегенерация. Стоит отметить, что информирование пользователей о вероятности развития киберболезни перед погружением в VR или заполнение анкеты о наличии её симптомов может спровоцировать эффект прайминга или якорения. Пользователи сообщают о большем количестве побочных эффектов, когда ожидают их появления [20].

Для максимально естественного восприятия виртуальной среды VR-система должна воздействовать на все органы чувств. Основной объём воспринимаемой человеком информации поступает через зрительный анализатор, поэтому состояние пользователя напрямую зависит от характеристик визуального дисплея.

Основными факторами, от которых зависит качество визуального дисплея, являются [36]:

1. Пространственное разрешение, то есть количество пикселей на дюйм (*pixels per inch — PPI*). Разрешение, существующее сегодня в VR-гарнитурах, слишком мало для естественного восприятия. Плотность пикселей на дисплее должна быть такой, чтобы пользователь не воспринимал их отдельно друг от друга.

2. Диапазон яркости. Весь диапазон яркостей, которые зрительный анализатор человека способен воспринять, огромен: от 10–6 кд/м² для глаза, полностью адаптированного к темноте, до 106 кд/м² для глаза, полностью адаптированного к свету. Современные дисплеи имеют только 256 возможных численных значений яркости, что также не соответствует естественному восприятию, а переход к скопическому зрению не представляется возможным.

3. Частота обновления пикселей на дисплее. Требуется более высокая частота кадров по сравнению со стандартами телевидения или кино. При 60 кадрах в секунду пользователем ощущается мерцание движущегося объекта, что может привести к усталости или головной боли. Например, при увеличении частоты кадров до 90 побочные эффекты исчезают почти у всех пользователей.

Изображение объекта на сетчатке незначительно смещается вследствие постоянного движения человеческого глаза, а также из-за оптических искажений. Наличие артефактов VR-системы может привести к такому смещению изображения на сетчатке, которое не встречается в реальном мире. Последствия этого мало изучены и практически не описаны в научной литературе: они могут способствовать появлению усталости и, возможно, развитию VR-болезни, нарушая микросаккады [52].

Виртуальный мир воспринимается пользователем как мнимое удалённое расстояние, хотя на самом деле он находится на дисплее на неизменном расстоянии не более 15 см от глаз, что может привести к дополнительному напряжению зрительного анализатора и усталости после длительного использования VR, так как для сохранения чёткого изображения на сетчатке вергенция должна происходить при неизменной аккомодации [53]. Следовательно, изображение, формируемое на визуальном дисплее, может вызвать конфликт вергенции и аккомодации глаз.

Факторы, влияющие на развитие VRISE и уровни их доказательности
Factors influencing the development of VRISE and their levels of evidence

VRISE	Индивидуальные факторы	Факторы аппаратного обеспечения	Факторы программного обеспечения
Киберболезнь	– опыт выполнения задач в реальном мире (V) – опыт нахождения в VR (V) – наличие игрового опыта (VI) – длительность нахождения в VR (III) – доминирование глаз (VI) – стереоскопическое зрение (VI) – постуральная устойчивость (V) – наличие в анамнезе головных болей/мигрени (VI) – индекс массы тела (VII) – возраст (VII) – пол (V) – этническая принадлежность (V) – коррекция зрения (V) – предрасположенность к укачиванию (V) – уровень концентрации (VI) – способность к мысленному вращению (VI) – перцептивный стиль (–)	– разрешение экрана (IV) – горизонтальное и вертикальное поле зрения (V) – вес дисплея (VI) – тип дисплея (V) – задержки в работе устройств (IV) – тип передвижения в VR (IV) – калибровка устройств (V) – ошибки трекинга позиции (V) – метод трекинга (V) – необходимость совершать движения головой (VI) – стереоскопический рендеринг (V) – настройки межзрачкового расстояния (V) – расстояние экрана до глаз (V) – частота обновления (V) – тип тактильной обратной связи (VI) – температура окружающей среды (VII) – обонятельная обратная связь (VII) – звуковая обратная связь (VII)	– скорость линейного ускорения вращения (IV) – скорость самостоятельного перемещения и вращения (V) – векция (V) – высота над поверхностью земли (VI) – степень контроля движений (VI) – яркость экрана (IV) – характеристики цвета (IV) – характеристики контраста (VI) – сложность сценария VR (V) – визуальный поток (VI) – ориентировочные сигналы (IV) – зоны зрительного внимания (IV) – соотношение объектов в виртуальном и реальном мирах (VI) – автономный зрительный фон (VI) – положение «стоя» или «сидя» (IV)
Зрительное утомление	– возраст (VI) – стереоскопическое зрение (III) – конфликт вергенции-аккомодации (III)	– оптическое несоответствие между линзами HMD и глазами (IV) – геометрические искажения (IV) – характеристики яркости (IV) – синий свет (VII)	– длительность использования дисплея (III) – бинокулярная диспаратность (IV) – параллакс движения (IV) – текстурные градиенты (VII) – окклюзия (IV) – размытие изображения (IV) – цвета изображения (IV)
Мышечное утомление	– возраст (VI) – индекс массы тела (VI)	– вес HMD (IV) – наличие креплений HMD к голове (VI) – характеристики устройств взаимодействия (VI) – ошибки трекинга положения тела (V) – разрешение HMD (IV)	– длительность нахождения в VR (VI) – расположение угла наклона объекта (VI) – амплитуда жестов (VI) – повторяющиеся движения (V) – повороты головы в HMD (VI) – поза тела (VI) – положение «стоя» или «сидя» (IV) – обратная связь о позе и жестах аватара (IV)
Острый стресс	– возраст (VII) – индекс массы тела (II)	– техносложность (VII) – техноперегрузка (VI)	– дефицит времени (V) – сложность задачи (IV) – публичные выступления (II) – воздействие дистрессового материала (VI) – шум (IV)
Умственное переутомление	—	—	– дефицит времени (VII) – сложность задачи (V)

Рекомендуется, чтобы объекты в стереоскопии находились на расстоянии 2 м от пользователя [41].

Хотя работа в виртуальной среде не влияет на рефракцию и бинокулярное зрение (стабильность взгляда, стереопис и амплитуду аккомодации), после воздействия VR может наблюдаться утолщение хориоидеи. Утолщение сосу-

дистой оболочки характерно для миопической дефокусировки, которая приводит в дальнейшем к развитию дальнорозоркости [54]. Часто у пользователей наблюдается миопический сдвиг более 0,5 диоптрий, но изменения проходят в течение часа после прекращения работы в VR [55]. Использование шлемов виртуальной реальности приводит

к значительному уменьшению частоты моргания глаз, вследствие чего может развиваться кератит и синдром сухого глаза [56].

Кроме того, на состояние пользователя сильное воздействие оказывает задержка зрительного сигнала. Даже незаметная на сознательном уровне, она является одним из ведущих факторов развития киберболезни. Пользователь со временем может приспособиться к постоянной задержке сигнала, однако при возвращении в реальный мир большинство объектов будут казаться подвижными.

Со зрительной системой тесно связан вестибулярный аппарат: вместе со зрительной и двигательной рецепторными системами он играет ведущую роль в ориентации человека в пространстве. Пренебрежение физиологией вестибулярной системы при разработке VR-систем приводит к рассогласованию воспринимаемых сигналов. На сегодняшний день в системах виртуальной реальности нет специального устройства, способного передавать вестибулярные сигналы на дисплей, стимулирующий вестибулярный аппарат до требуемых значений. Вестибулярная система хорошо функционирует при согласовании сигналов с другими системами, включая зрение и проприоцепцию. При неправильном функционировании системы может развиваться головокружение, тошнота, рвота, потливость и затруднения при ходьбе.

Одной из основных нерешённых проблем, вызывающей негативные последствия для состояния человека, является несоответствие визуальных и вестибулярных сигналов, которое возникает из-за кажущегося собственного движения в VR при неподвижности тела в реальном мире: зрительный анализатор передаёт сигнал в головной мозг об ускорении, а орган равновесия — об отсутствии реального движения. Иллюзия самодвижения (векция) представляет собой ощущение перемещения тела человека в пространстве во время наблюдения за движущейся стимуляцией, занимающей большую часть поля зрения неподвижного наблюдателя или путём перемещения точки обзора пользователя [57]. У многих пользователей векция приводит к головокружению, тошноте и, в редких случаях, рвоте.

Если на визуальном дисплее движется только небольшая часть поля зрения, пользователь полагает, что это вызвано перемещающимся объектом. Однако, если движется большая часть поля зрения, пользователь считает, что движется он сам. Зрительная система активизирует нейроны с рецептивными полями, которые покрывают большую часть сетчатки с целью обнаружения собственного движения. По мере того, как разработчики увеличивают поле зрения гарнитур VR, изображение соответственно проецируется на большую область сетчатки глаза, тем самым усиливая векцию.

Для того чтобы опыт виртуального мира был правдоподобным, генерируемые ощущения, действующие на тела силы и движение объектов должны быть привычны для восприятия пользователя. Ключевая задача при разработке программного обеспечения заключается в том, чтобы виртуальный мир постоянно обновлялся, взаимодействие между пользователем и объектами виртуального мира были хорошо синхронизированы, а средства визуализации обеспечивали проекцию изображения на дисплей с малой задержкой.

Одним из свойств VR-среды является её иммерсивность — степень сенсорного «погружения» пользователя в виртуальный мир, при которой восприятие внешних сенсорных сигналов значительно снижается или даже

полностью блокируется [58]. Иммерсивные свойства VR обеспечиваются не только технологическими устройствами, но и индивидуально-психологическими особенностями личности пользователя. Эффект сенсорного погружения и выраженность симптомов VR-болезни отрицательно коррелируют: при большей глубине иммерсивности наблюдается меньше негативных симптомов, а при возникновении симптомов степень иммерсивности снижается [59]. Вероятно, ощущение присутствия в среде с глубокой иммерсивностью подавляет сенсорный конфликт, поскольку внимание занято интенсивным потоком виртуальной мультисенсорной стимуляции [60].

Проведённый анализ научных публикаций показал, что большинство исследований посвящено только одному VR-ISE из 5, при этом наиболее надёжной доказательной базой обладает состояние киберболезни. Большинство мета-анализов и систематических обзоров основаны на результатах анкетирования, что может свидетельствовать о недостаточном уровне доказательности и надёжности данных, полученные выводы и рекомендации для разработчиков и пользователей VR могут быть ошибочными и необъективными.

Важным ограничением большинства работ также является отсутствие сведений об оценке влияния на организм человека длительной работы в расширенных средах, хотя профессиональная деятельность может подразумевать ежедневное использование XR-технологий.

Если говорить о VR-ISE, возникающих из-за проблем в аппаратном и/или низкоуровневом программном обеспечении, во многих случаях их истинной причиной является разработчик, неправильно понимающий или игнорирующий побочные эффекты взаимодействия виртуальной среды с пользователем. Компании-разработчики часто заявляют о решении технических и аппаратных проблем, вызывающих VR-ISE, однако при этом игнорируют следующее противоречие: если гарнитура лучше с точки зрения пространственного разрешения дисплея, частоты кадров, точности отслеживания и времени задержки сигнала, то вероятность ухудшения самочувствия пользователей будет выше вследствие развития векции и восприятия несовпадающих стимулов. Если сенсорные сигналы от дисплеев виртуальной реальности становятся интенсивнее и более точно имитируют естественные стимулы, то мозг пользователя отчётливее воспринимает сенсорный конфликт между ощущениями от реального и виртуального мира.

Механизмы воздействия XR-технологий на организм и психические процессы работника, а также последствия их использования и возможные побочные эффекты остаются открытыми. Стоит отметить, что также остаются открытыми вопросы проведения гигиенической оценки факторов рабочей среды и трудового процесса на рабочем месте работников, применяющих в своей деятельности VR-технологии, в частности, по фактору напряжённости трудового процесса (плотность сигналов и сообщений в среднем за 1 час работы).

Поэтому актуальной на сегодняшний день является необходимость повышения качества и воспроизводимости исследований VR-ISE, а также разработки требований к:

- 1) санитарно-гигиеническим и эргономическим характеристикам оборудования;
- 2) проведению исследования безопасности и эффективности применения экспериментальных образцов устройств и сценариев виртуальной реальности перед началом использования на производстве;

3) средствам и методикам оценки влияния XR и её программного и аппаратного обеспечения на человека;
4) критериям отбора пользователей для работы в XR (пол, возраст, состояние здоровья и др.);

5) условиям использования XR-систем (длительность нахождения в виртуальной среде, особенности окружающего пространства и др.);

6) процессам адаптации и повышения тренированности пользователей.

Список литературы / References

- Hamilton D., McKechnie J., Edgerton E., Wilson C. Immersive virtual reality as a pedagogical tool in education: a systematic literature review of quantitative learning outcomes and experimental design. *Journal of Computers in Education*. 2020; 8: 1–32. <https://doi.org/10.1007/s40692-020-00169-2>
- Huang T.L., Liao S.L. Creating e-shopping multisensory flow experience through augmented-reality interactive technology. *Internet Research*. 2017; 27(2): 449–75. <https://doi.org/10.1108/IntR-11-2015-0321>
- Arino J.J., Juan M.C., Gil-Gomez J.A., Molla R. A comparative study using an autostereoscopic display with augmented and virtual reality. *Behaviour & Information Technology*. 2014; 33: 646–55. <https://doi.org/10.1080/0144929X.2013.815277>
- Huang T.C., Chen C.C., Chou Y.W. Animating eco-education: To see, feel, and discover in an augmented reality-based experiential learning environment. *Computers & Education*. 2016; 96: 72–82. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2016.02.008>
- De Oliveira Malaquias F.F., Malaquias R.F. The role of virtual reality in the learning process of individuals with intellectual disabilities. *Technology and Disability*. 2017; 28(4): 133–38. <https://doi.org/10.3233/TAD-160454>
- Fonseca D., Martí N., Redondo E., Navarro I., Sanchez A. Relationship between student profile, tool use, participation, and academic performance with the use of Augmented Reality technology for visualized architecture models. *Computers in Human Behavior*. 2014; 31: 434–45. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2013.03.006>
- Huang H.M., Rauch U., Liaw S.S. Investigating learners' attitudes toward virtual reality learning environments: Based on a constructivist approach. *Computers & Education*. 2010; 55: 1171–82. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2010.05.014>
- Morelot S., Garrigou A., Dedieu J., N'Kaouab B. Virtual reality for fire safety training: Influence of immersion and sense of presence on conceptual and procedural acquisition. *Computers & Education*. 2021; 166: 104–45. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2021.104145>
- Champney R., Stanney K., Milham L., Carroll M., Cohn J. An examination of virtual environment training fidelity on training effectiveness. *International Journal of Learning Technology*. 2017; 12: 42–65. <https://doi.org/10.1504/IJLT.2017.083997>
- Awada M., Zhu R., Becerik-Gerber B., Lucas G., Southers E. An integrated emotional and physiological assessment for VR-based active shooter incident experiments. *Advanced Engineering Informatics*. 2021; 47: 101227. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101227>
- Kavanagh S., Luxton-Reilly A., Wünsche B., Plimmer B. A systematic review of Virtual Reality in education. *Themes in Science and Technology Education*. 2017; 10(2): 85–119.
- Williams-Bell F.M., Kapralos B., Hogue A., Murphy B.M., Weckman E.J. Using serious games and virtual simulation for training in the fire Service. *A review Fire Technology*. 2015; 51(3): 553–84. <https://doi.org/10.1007/s10694-014-0398-1>
- Piechowski S., Pustowalow W., Arz M., Rittweger J., Mulder E., Wolf O.T. et al. Virtual reality as training aid for manual spacecraft docking. *Acta Astronautica*. 2020; 177: 731–736. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.08.017>
- Joshi S., Hamilton M., Warren R., Faucett D., Tian W., Wang Y. et al. Implementing Virtual Reality technology for safety training in the precast/prestressed concrete industry. *Applied ergonomics*. 2021; 90: 103286. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2020.103286>
- Fracaro S.G., Chan P., Gallagher T., Tehreem Y., Toyoda R., Bernaerts K. et al. Towards design guidelines for virtual reality training for the chemical industry. *Education for Chemical Engineers*. 2021; 36: 12–23. <https://doi.org/10.1016/j.ece.2021.01.014>
- Firu A.C., Tapirdea A.I., Feier A.I., Drăghici G. Virtual reality in the automotive field in industry 4.0. *Materials Today: Proceedings*. 2021; 45(5): 4177–82. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.037>
- De Clerk M., Dangelmaier M., Schmierer G., Spath D. User Centered Design of Interaction Techniques for VR-Based Automotive Design Reviews. *Frontiers in Robotics and AI*. 2019; 6: 13. <https://doi.org/10.3389/frobt.2019.00013>
- Zhao H., Zhao Q.H., Ślusarczyk B. Sustainability and digitalization of corporate management based on augmented/virtual reality tools usage: China and other world IT companies' experience. *Sustainability*. 2019; 11(17): 4717. <https://doi.org/10.3390/su11174717>
- Khandelwal K., Upadhyay A.K. Virtual reality interventions in developing and managing human resources. *Human Resource Development International*. 2021; 24(2): 219–33. <https://doi.org/10.1080/13678868.2019.1569920>
- Souchet A.D., Lourdeaux D., Pagani A., Rebenitsch L. A narrative review of immersive virtual reality's ergonomics and risks at the workplace: cybersickness, visual fatigue, muscular fatigue, acute stress, and mental overload. *Virtual Reality*. 2023; 27(1): 19–50. <https://doi.org/10.1007/s10055-022-00672-0>
- Qiao J., Xu J., Li L., Ouyang Y.Q. The integration of immersive virtual reality simulation in interprofessional education: A scoping review. *Nurse Education Today*. 2021; 98: 104773. <https://doi.org/10.1016/j.nedt.2021.104773>
- Yan C., Wu T., Huang K., He J., Liu H., Hong Y. et al. The Application of Virtual Reality in Cervical Spinal Surgery: A Review. *World Neurosurgery*. 2021; 145: 108–13. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2020.09.040>
- García-Bravo S., Cuesta-Gómez A., Campuzano-Ruiz R., López-Navas M.J., Domínguez-Paniagua J., Araújo-Narváez A. et al. Virtual reality and video games in cardiac rehabilitation programs. A systematic review. *Disability and rehabilitation*. 2021; 43(4): 448–57. <https://doi.org/10.1080/09638288.2019.1631892>
- Leemhuis E., Esposito R.M., Gennaro L.D., Pazzaglia M. Go Virtual to Get Real: Virtual Reality as a Resource for Spinal Cord Treatment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021; 18(4): 1819. <https://doi.org/10.3390/ijerph18041819>
- Puel F., Minville V., Vardon-Boune F. What place for virtual reality in the intensive care unit during medical procedures? *Journal of Intensive Care*. 2021; 9(1): 1–3. <https://doi.org/10.1186/s40560-021-00545-9>
- Rutkowski S., Szczegielniak J., Szczepańska-Gieracha J. Evaluation of the efficacy of immersive virtual reality therapy as a method supporting pulmonary rehabilitation: A randomized controlled trial. *Journal of Clinical Medicine*. 2021; 10(2): 352. <https://doi.org/10.3390/jcm10020352>
- Li R., Tong Y., Yang T., Guo J., Si W., Zhang Y. et al. Towards Quantitative and Intuitive Percutaneous Tumor Puncture via Augmented Virtual Reality. *Computerized Medical Imaging and Graphics*. 2021; 90: 101905. <https://doi.org/10.1016/j.compmedimag.2021.101905>
- Geraets C.N., van der Stouwe E.C., Pot-Kolder R., Veling W. Advances in immersive virtual reality interventions for mental

- disorders—a new reality? *Current opinion in psychology*. 2021; 41: 40–5. <https://doi.org/10.1016/j.copsyc.2021.02.004>
29. Huang B., Li S., Sun B., Xu W., Jiao J., Pan F. et al. Verification of using virtual reality to evaluate deficiencies in cognitive function among patients with schizophrenia in the remission stage: a cross-sectional study. *BMC psychiatry*. 2021; 21(1): 1–8. <https://doi.org/10.1186/s12888-020-03029-6>
 30. Rose V., Stewart I., Jenkins K.G., Tabbaa L., Ang C.S., Matsangidou M. Bringing the outside in: The feasibility of virtual reality with people with dementia in an inpatient psychiatric care setting. *Dementia*. 2021; 20(1): 106–29. <https://doi.org/10.1177/1471301219868036>
 31. De Luca R., Leonardi S., Portaro S., Le Cause M., De Domenico C., Colucci P.V. et al. Innovative use of virtual reality in autism spectrum disorder: A case-study. *Applied Neuropsychology: Child*. 2021; 10(1): 90–100. <https://doi.org/10.1080/21622965.2019.1610964>
 32. European Agency for Safety and Health at Work, Digitalisation and occupational safety and health (OSH): an EU-OSHA research programme, Publications Office of the European Union, 2020. <https://data.europa.eu/doi/10.2802/559587>
 33. Milgram P., Takemura H., Utsumi A., Kishino F. Augmented reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum. *Telemanipulator and telepresence technologies*. 1995; 2351: 282–92. <https://doi.org/10.1117/12.197321>
 34. Cardenas-Robledo L.A., Hernández-Urbe Ó., Reta C., Cantoral-Ceballos J.A. Extended reality applications in industry 4.0. — A systematic literature review. *Telematics and Informatics*. 2022; 73: 101863. <https://doi.org/10.1016/j.tele.2022.101863>
 35. Cobb S.V.G., Nichols S., Ramsey A., Wilson J.R. Virtual reality-induced symptoms and effects (VRISE). *Presence*. 1999; 8: 169–86. <https://doi.org/10.1162/105474699566152>
 36. LaValle S.M. *Virtual reality*. Cambridge University Press; 2019.
 37. Stanney K., Lawson B.D., Rokers B., Dennison M., Fidopiastis C., Stoffregen T. et al. (2020b). Identifying causes of and solutions for cybersickness in immersive technology: reformulation of a research and development agenda. *Int. J. Hum. Comput. Interact.* 2020; 36: 1783–803. <https://doi.org/10.1080/10447318.2020.1828535>
 38. Ohyama S., Nishiike S., Watanabe H., Matsuoka K., Akizuki H., Takeda N. et al. Autonomic responses during motion sickness induced by virtual reality. *Auris Nasus Larynx*. 2007; 34: 303–6. <https://doi.org/10.1016/j.anl.2007.01.002>
 39. *Handbook of virtual environments: design, implementation, and applications, second edition*. ed. K.S. Hale, K.M. Stanney. CRC Press; 2014. <https://doi.org/10.1201/b17360>
 40. Chan Z., MacPhail A., Au I., Zhang J., Lam B.M., Ferber R., Cheung R.T. Walking with head-mounted virtual and augmented reality devices: Effects on position control and gait biomechanics. *PLoS ONE*. 2019; 14(12): e0225972. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0225972>
 41. Souchet A.D., Lourdeaux D., Burkhardt J.M., Hancock P.A. Design guidelines for limiting and eliminating virtual reality-induced symptoms and effects at work: a comprehensive, factor-oriented review. *Frontiers in Psychology*. 2023; 14: 1161932. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1161932>
 42. Stanney K.M., Kennedy R.S. Aftereffects from virtual environment exposure: How long do they last? *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. 1998; 48(2): 1476–80. <https://doi.org/10.1177/154193129804202103>
 43. Moss J.D., Muth E.R. Characteristics of head-mounted displays and their effects on simulator sickness. *Human Factors*. 2011; 53: 308–19. <https://doi.org/10.1177/0018720811405196>
 44. Keshavarz B., Ramkhalawansingh R., Haycock B., Shahab S., Campos J.L. Comparing simulator sickness in younger and older adults during simulated driving under different multisensory conditions. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*. 2018; 54: 47–62. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2018.01.007>
 45. Kourtesis P., Collina S., Doumas L., MacPherson S. Validation of the Virtual Reality Neuroscience Questionnaire: Maximum Duration of Immersive Virtual Reality Sessions Without the Presence of Pertinent Adverse Symptomatology. *Front. Hum. Neurosci.* 2019; 13: 417. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00417>
 46. Hertweck S., Weber D., Alwanni H., Unruh F., Fischbach M., Latoschik M. et al. Brain Activity in Virtual Reality: Assessing Signal Quality of High-Resolution EEG While Using Head-Mounted Displays. In: *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*. IEEE; 2019: 970–1. <https://doi.org/10.1109/VR.2019.8798369>
 47. Hansberger J.T., Peng C., Mathis S.L., Shanthakumar V.A., Meacham S.C., Cao L. et al. Dispelling the gorilla arm syndrome: the viability of prolonged gesture interactions. In: *International conference on virtual, augmented and mixed reality*. Springer, Cham; 2017: 505–20. https://doi.org/10.1007/978-3-319-57987-0_41
 48. Chihara T., Seo A. Evaluation of physical workload affected by mass and center of mass of head-mounted display. *Applied Ergonomics*. 2018; 68: 204–12. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.11.016>
 49. Yan Y., Chen K., Xie Y., Song Y., Liu Y. The effects of weight on comfort of virtual reality devices. In: *International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics*. Springer, Cham; 2018: 239–48. https://doi.org/10.1007/978-3-319-94706-8_27
 50. Lutz O., Burmeister C., dos Santos L., Morkisch N., Dohle C., Krüger J. Application of head-mounted devices with eye-tracking in virtual reality therapy. *Current Directions in Biomedical Engineering*. 2017; 3(1): 53–6. <https://doi.org/10.1515/cdbme-2017-0012>
 51. Ackley B.J., Ladwig G.B., Swan B.A., Tucker S.J. *Evidence-based nursing care guidelines*. 1st ed. Amsterdam: Mosby Elsevier, 2008.
 52. Howard M.C., Van Zandt E.C. A meta-analysis of the virtual reality problem: Unequal effects of virtual reality sickness across individual differences. *Virtual Reality*. 2021; 25: 1221–46. <https://doi.org/10.1007/s10055-021-00524-3>
 53. Engbert R., Mergenthaler K. Microsaccades are triggered by low retinal image slip. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2006; 103(18): 7192–7. <https://doi.org/10.1073/pnas.0509557103>
 54. Shibata T., Kim J., Hoffman D.M., Banks M.S. The zone of comfort: predicting visual discomfort with stereo displays. *Journal of Vision*. 2011; 11(8): 1–29. <https://doi.org/10.1167/11.8.11>
 55. Turnbull P.R., Phillips J.R. Ocular effects of virtual reality headset wear in young adults. *Scientific reports*. 2017; 7(1): 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-16320-6>
 56. Yoon H.J., Kim J., Park S.W., Heo H. Influence of virtual reality on visual parameters: immersive versus non-immersive mode. *BMC ophthalmology*. 2020; 20: 1–8. <https://doi.org/10.1186/s12886-020-01471-4>
 57. Kim J., Sunil K., Yoo J., Kwon S. Change of Blink Rate in Viewing Virtual Reality with HMD. *Symmetry*. 2018; 10(9): 400. <https://doi.org/10.3390/sym10090400>
 58. Palmisano S., Allison R.S., Schira M.M., Barry R.J. Future challenges for vection research: definitions, functional significance, measures, and neural bases. *Front. Psychol.* 2015; 6: 193. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00193>
 59. Suh A., Prophet J. The state of immersive technology research: A literature analysis. *Computers in Human Behavior*. 2018; 86: 77–90. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2018.04.019>
 60. Weech S., Kenny S., Barnett-Cowan M. Presence and Cybersickness in Virtual Reality Are Negatively Related: A Review. *Frontiers in psychology*. 2019; 10: 158. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.00158>
 61. Cooper N., Milella F., Cant I., Pinto C., White M.D., Meyer G.F. The effects of multisensory cues on the sense of presence and task performance in a virtual reality environment. *Perception*. 2016; 45: 332–3.