

УДК 316.6, 159.9

DOI: 10.34670/AR.2026.48.71.006

Когнитивные нагрузки в иммерсивных средах: риски и адаптационные стратегии

Веселов Макар Валерьевич

Магистрант,
Сибирский федеральный университет,
660041, Российская Федерация, Красноярск, Свободный просп., 79/3;
e-mail: pepegamonkaomega@gmail.com

Аннотация

Статья посвящена анализу рисков когнитивной перегрузки при использовании иммерсивных сред, в частности технологий виртуальной реальности (VR), в обучении и профессиональной подготовке. В центре внимания — проблема унифицированных VR-решений, не учитывающих индивидуальные различия пользователей (когнитивные способности, эмоциональный фон, уровень когнитивной нагрузки). В работе раскрываются механизмы возникновения когнитивной перегрузки в VR-средах с опорой на теорию когнитивной нагрузки (внутренняя, посторонняя и релевантная нагрузка). Описываются физиологические маркеры перегрузки (вариабельность сердечного ритма, расширение зрачков, ЭЭГ) и их связь с эмоциональными реакциями (стресс, фрустрация). Автор проводит систематический обзор литературы для оценки методов измерения когнитивной нагрузки и подходов к адаптации VR-сред (на основе правил и на основе машинного обучения). Предлагаются стратегии персонализации обучения: использование мультимодальных данных, адаптация в реальном времени, учёт конфиденциальности физиологических данных. Практическая значимость исследования состоит в разработке рекомендаций для проектирования адаптивных VR-систем в образовании и здравоохранении, позволяющих повысить вовлечённость, снизить стресс и оптимизировать процесс обучения с учётом индивидуальных особенностей пользователя.

Для цитирования в научных исследованиях

Веселов М.В. Когнитивные нагрузки в иммерсивных средах: риски и адаптационные стратегии // Психология. Историко-критические обзоры и современные исследования. 2026. Т. 15. № 4А. С. 23-37. DOI: 10.34670/AR.2026.48.71.006

Ключевые слова

Виртуальная реальность (VR), иммерсивные среды, когнитивная нагрузка, когнитивная перегрузка, адаптация в VR, физиологические сигналы, теория когнитивной нагрузки, машинное обучение.

Введение

Иммерсивные среды, в частности технологии виртуальной реальности (VR), открывают принципиально новые возможности для обучения, профессиональной подготовки и терапии. Они обеспечивают захватывающее, безопасное и достоверное моделирование реальных условий, позволяя пользователям отрабатывать сложные навыки без риска и с высокой степенью вовлечённости [Eckert, Habets, Rummukainen, 2021; Bigonah et al., 2025; Nasri, 2025].

Однако растущая популярность VR-приложений для обучения и тренировки выявляет серьёзную проблему: большинство существующих решений предлагают унифицированный опыт, не учитывающий индивидуальные различия пользователей - в том числе их когнитивные способности, эмоциональный фон и текущий уровень когнитивной нагрузки. Такой подход чреват когнитивной перегрузкой, которая приводит к стрессу, фрустрации и снижению эффективности обучения [Nasri, 2025; Nasri et al., 2024b].

Актуальность исследования обусловлена тем, что в условиях иммерсивной среды риски когнитивной перегрузки возрастают: обилие сенсорной информации, высокая степень интерактивности и реалистичность окружения могут превышать ограниченные ресурсы рабочей памяти. Согласно теории когнитивной нагрузки, перегрузка возникает, когда объём информации, требующей обработки, превышает возможности рабочей памяти. Когнитивная нагрузка (КН) включает:

- внутреннюю нагрузку (intrinsic load, IL) - определяется сложностью самого материала;
- постороннюю нагрузку (extraneous load, EL) - создаётся неэффективным дизайном интерфейса или избыточными отвлекающими факторами.
- Когнитивная перегрузка запускает каскад негативных последствий:
- снижение производительности и мотивации ;
- активацию вегетативной нервной системы, проявляющуюся в физиологических реакциях (расширение зрачков, снижение вариабельности сердечного ритма - BCP) [Hou et al., 2025];
- формирование цикла обратной связи, в котором стресс ещё больше ухудшает когнитивные функции, снижая вовлечённость и результаты обучения [Hou et al., 2025].

Цель данной статьи - проанализировать риски когнитивных нагрузок в иммерсивных средах и предложить научно обоснованные адаптационные стратегии, позволяющие минимизировать негативные последствия и повысить эффективность взаимодействия пользователя с VR-средой.

Практическая значимость работы заключается в разработке адаптационных стратегий, позволяющих:

- предотвращать когнитивную перегрузку и снижать стресс в иммерсивных средах;
- оптимизировать сложность учебных и тренировочных задач под индивидуальные возможности пользователя;
- повышать вовлечённость, мотивацию и результаты обучения;
- создавать неинвазивные и экономичные решения для здравоохранения (например, для снижения стресса или управления болью) [Hou et al., 2025].

В статье последовательно рассматриваются механизмы возникновения когнитивной перегрузки в VR, методы её объективной оценки и перспективные подходы к адаптации иммерсивных сред. Особое внимание уделяется интеграции биологической обратной связи с состоянием пользователя как ключевому элементу будущих систем виртуальной и дополненной

реальности (AR), обеспечивающему более захватывающий, адаптивный и функциональный опыт.

Теория

Когнитивная нагрузка существенно влияет на эмоции пользователей, особенно на стресс и фрустрацию. Когда когнитивные потребности превышают возможности рабочей памяти пользователя, уровень стресса повышается, что снижает производительность и вовлеченность [Nasri et al., 2024].

Физиологические реакции, такие как расширение зрачков и снижение ВСП, коррелируют с высокой когнитивной нагрузкой, что делает их ценными сигналами для адаптации в реальном времени [Nasri et al., 2024].

Кроме того, когнитивная перегрузка может спровоцировать эмоциональный стресс, что приводит к возникновению обратной связи, при которой повышенный стресс еще больше ухудшает когнитивные функции [Nasri, 2025].

Понимание этих физиологических реакций позволяет вычислительным моделям определять когнитивную нагрузку и динамически корректировать опыт виртуальной реальности для снижения стресса и повышения вовлеченности.

Механизмы адаптации виртуальной реальности можно разделить на два основных подхода: адаптация на основе правил и адаптация, управляемая данными. Адаптация на основе правил: эти подходы используют предопределенные эвристики для изменения параметров виртуальной реальности, таких как сложность задачи, особенности окружающей среды и механика взаимодействия. В некоторых исследованиях сложность динамически корректируется для поддержания вовлеченности путем изменения сложности [Nasri, 2025; Dey, Chatburn, Billingham, 2019; Izuntar et al., 2021].

Другие адаптируют механику восприятия, изменяя виртуальные позиции пользователей или характеристики стимулов [Eckert, Habets, Rummukainen, 2021; Baldini et al., 2024; Uyan, Celikcan, 2024].

Адаптация к окружающей среде, такая как изменение цвета или введение таких элементов, как туман, также играет роль в адаптации к погружению [Nasri, 2025; Nasri et al., 2024a; Nasri et al., 2024b].

Адаптация, основанная на данных: более современные подходы интегрируют физиологические и поведенческие данные для адаптации опыта. Эти модели используют физиологические сигналы, такие как частота сердечных сокращений, ЭЭГ и отслеживание движения глаз, чтобы определить состояние пользователя и соответствующим образом изменить окружающую среду. Например, [Baldini et al., 2024] разработали систему виртуальной реальности, которая смягчает киберболезнь, адаптируя скорость навигации и сложность сцены на основе сигналов ЭЭГ. В некоторых исследованиях используется адаптация поведения NPC (Персонаж управляемый компьютером), например, оптимизация взаимодействий с NPC на основе ответов пользователей [Chiossi, Оц, Mayer, 2024; Nasri, 2025].

Хотя эти механизмы адаптации улучшают погружение, большинство из них полагаются на предопределенные эвристики. Для повышения адаптивности были изучены вычислительные модели, которые используют физиологические ощущения в реальном времени.

Вычислительные модели для адаптации в виртуальной реальности делятся на две основные категории: прямая физиологическая адаптация и адаптация на основе ML (машинное обучение).

Прямая физиологическая адаптация: В некоторых исследованиях используются физиологические сигналы в реальном времени для запуска немедленных изменений окружающей среды. Например, изменения в электрокожной активности могут регулировать освещение или звуковые эффекты в сценариях релаксации в виртуальной реальности [Moldoveanu et al., 2023; Salminen et al., 2024].

Другие системы используют поведение взгляда для предоставления адаптивных подсказок в обучающих приложениях [Hou et al., 2025].

Адаптация на основе ML: Более продвинутые модели используют машинное обучение для прогнозирования состояний пользователя и адаптации опыта. Однако лишь в немногих исследованиях была реализована физиологическая адаптация в режиме реального времени с использованием ML [Izuntar et al., 2021; Gomes et al., 2023; Lima, Silva, Galam, 2022; Moon et al., 2023; Uyan, Celikcan, 2024].

Существующие модели в основном ориентированы на обнаружение возбуждения, но не позволяют распознавать мультимодальные эмоции. Для извлечения признаков из физиологических сигналов и оптимизации виртуальных сред использовались такие методы, как искусственные нейронные сети, методы опорных векторов и случайные леса (алгоритмы, принимающие решения путем голосования множества независимых «деревьев-опросников») [Lima, Silva, Galam, 2022; Lee et al., 2023; Izuntar et al., 2021; Kritikos, Alevizopoulos, Koutsouris, 2021].

Несмотря на эти достижения, физиологическая адаптация в реальном времени остается недостаточно изученной областью, особенно в адаптивных системах, ориентированных на конфиденциальность.

В то время как физиологическая адаптация предлагает многообещающие способы улучшения опыта виртуальной реальности, этические аспекты остаются в значительной степени нерешенными. Сбор и обработка физиологических данных в режиме реального времени вызывают опасения по поводу конфиденциальности, особенно в отношении безопасности данных, согласия пользователя и потенциального неправомерного использования [Williams et al., 2022].

Ни в одном из исследований не предлагаются основы для физиологической адаптации с учетом конфиденциальности, что оставляет серьезный пробел в этой области. Исследовательский пробел: существует потребность в адаптивных системах виртуальной реальности, которые не только интегрируют физиологические данные для адаптации в режиме реального времени, но и уделяют приоритетное внимание вопросам конфиденциальности. Целью данного исследования является разработка системы физиологической адаптации с учетом конфиденциальности, которая определяет когнитивную нагрузку и динамически корректирует опыт обучения виртуальной реальности в режиме реального времени.

В основе исследования лежит теория когнитивной нагрузки, согласно которой учебные материалы могут создавать три типа когнитивной нагрузки на обучающегося: внутреннюю (intrinsic load, IL), постороннюю (extraneous load, EL) и релевантную (germane load, GL). Внутренняя нагрузка определяется сложностью задачи и уровнем предварительных знаний учащегося: чем сложнее задача и чем ниже уровень знаний, тем выше IL. Посторонняя нагрузка провоцируется неэффективными элементами учебных материалов - такими, которые не способствуют усвоению материала и лишь отвлекают внимание. Релевантная нагрузка, напротив, создаётся полезными элементами обучения, способствующими формированию устойчивых когнитивных схем и глубокому усвоению информации.

При проектировании учебных программ важно придерживаться следующих принципов: оптимизировать IL за счёт подбора заданий, соответствующих уровню знаний учащихся; минимизировать EL путём устранения отвлекающих и неэффективных элементов; стимулировать GL через включение компонентов, которые помогают строить когнитивные схемы. При оптимальной IL и низкой EL учащиеся могут сосредоточиться на процессах углубления знаний, что способствует лучшему усвоению материала.

Особого внимания заслуживает эффект обращения экспертизы: он показывает, что методы обучения должны варьироваться в зависимости от уровня подготовки учащихся. Так, учащиеся с низким уровнем знаний лучше усваивают материал через разбор готовых примеров - это снижает постороннюю нагрузку и повышает релевантную, позволяя формировать необходимые схемы. В свою очередь, учащиеся с высоким уровнем знаний эффективнее обучаются через самостоятельное решение задач: для них такой подход обеспечивает оптимальную нагрузку и способствует более глубокому пониманию предмета.

Внутренняя когнитивная нагрузка зависит от количества элементов, которые необходимо одновременно обрабатывать в рабочей памяти, а также от уровня компетентности учащегося. Посторонняя когнитивная нагрузка, в свою очередь, определяется способом подачи информации и дизайном учебной задачи.

Ряд исследований подчёркивает особую значимость когнитивной нагрузки при обучении в условиях иммерсивной виртуальной реальности (IVR). Установлено, что обучение в IVR приводит к более высокой посторонней когнитивной нагрузке по сравнению с менее иммерсивными медиа. Это подчёркивает необходимость учёта когнитивной нагрузки при разработке учебных инструментов на базе IVR.

Иммерсивные VR-системы расширяют поле зрения по сравнению с обычным монитором, что усиливает ощущение присутствия. Однако это же может повышать постороннюю когнитивную нагрузку: учащимся приходится самостоятельно искать релевантный контент, особенно если он содержит отвлекающие детали, не имеющие отношения к обучению. Согласно модели CAMIL (Когнитивно-аффективная модель иммерсивного обучения), существует положительная связь между ощущением присутствия и посторонней когнитивной нагрузкой [Makransky et al., 2020].

Ещё одной причиной посторонней когнитивной нагрузки может стать высокий уровень агентности - то есть степень свободы действий и выбора, предоставляемая учащемуся. Например, исследование авторов показало, что IVR-интервенция, дававшая учащимся автономию в выборе контента и взаимодействии с элементами интерактивной лабораторной симуляции, оказалась неоптимальной для обучения. Избыточная свобода привела к росту посторонней когнитивной нагрузки, которая, в свою очередь, негативно повлияла на усвоение фактических, концептуальных и процедурных знаний, а также на перенос этих знаний [Makransky et al., 2020].

Методология исследования

Методология исследования начинается с проведения систематического обзора литературы (SLR) для выявления пробелов в исследованиях по эмоциональным вычислениям, физиологическому восприятию и дизайну виртуальной реальности (VR), а также для определения наиболее эффективных методов измерения когнитивной нагрузки и адаптации в VR-средах.

Таблица 1 – Вопросы для отбора литературы

Вопросы	Исследовательский вопрос
№1	Каковы основные типы когнитивной нагрузки (внутренняя, посторонняя, релевантная) в условиях виртуальной реальности и как они проявляются в процессе обучения?
№2	Какие физиологические сигналы (BCP, расширение зрачков, ЭЭГ и т.д.) наиболее точно коррелируют с уровнями когнитивной нагрузки и стресса в VR?
№3	Какие методы машинного обучения (ANN (Искусственная нейронная сеть) , SVM (Метод опорных векторов), случайные леса) наиболее успешны для прогнозирования когнитивной нагрузки в реальном времени?

На этапе отбора применяются строгие критерии включения: приоритет отдаётся исследованиям, фокусирующимся на использовании физиологических данных в режиме реального времени, имеющим прямую связь с когнитивной нагрузкой, стрессом или адаптацией в VR, а также содержащим эмпирические данные - такие как точность классификации когнитивной нагрузки, показатели производительности пользователей или валидированные шкалы оценки. В результате первичного поиска идентифицируется 64 статьи, из которых после анализа названий и аннотаций 52 признаются потенциально релевантными. Дальнейшая фильтрация по критериям включения позволяет выделить 28 статей.

В рамках SLR проводится детальный анализ отобранных исследований с акцентом на следующие аспекты:

- типы физиологических сигналов, используемых для оценки когнитивной нагрузки (ЭЭГ, BCP, расширение зрачков, глазодвигательные параметры и т.д.) и их корреляция с уровнями нагрузки и стресса;
- подходы к адаптации VR-сред, включая прямую физиологическую адаптацию и адаптацию на основе ML;
- ограничения существующих решений (артефакты ЭЭГ, индивидуальные различия, проблемы масштабируемости).

По итогам SLR формулируются ключевые выводы о текущем состоянии исследований:

- подтверждается высокая надёжность BCP и расширения зрачков как маркеров когнитивной нагрузки и стресса в VR;
- отмечается эффективность ансамблевых методов и нейросетевых подходов для классификации нагрузки на основе мультимодальных данных;
- выявляются пробелы в стандартизации протоколов сбора данных и валидации шкал оценки когнитивной нагрузки.

На основе результатов SLR разрабатывается и оценивается подход к созданию адаптивной VR-системы с учётом конфиденциальности.

Основная часть

Авторы выделяют ряд проблем в существующих методах измерения когнитивной нагрузки. Во-первых, наблюдается разнообразие шкал: исследователи используют разные варианты с различным количеством категорий и формулировками, причём многие из этих шкал не прошли валидацию. Во-вторых, в большинстве случаев для оценки общей когнитивной нагрузки или её отдельных типов применяется всего один пункт по шкале Лайкерта, что снижает надёжность данных. В-третьих, использование менее семи категорий в шкале может ограничивать уровень измерения до порядкового вместо интервального, что негативно сказывается на точности

результатов. В-четвёртых, характер нагрузки носит индивидуальный характер: один и тот же элемент обучения может создавать GL (способствовать обучению) для одного учащегося и EL (мешать обучению) для другого - в зависимости от его уровня знаний и опыта.

Для повышения точности измерений авторы предлагают несколько решений: разработать альтернативные формулировки вопросов для оценки EL и GL; использовать несколько пунктов для каждого типа когнитивной нагрузки; применять шкалы, отличающиеся от тех, что использовались в предыдущих исследованиях.

Анализ также показал, что разбор примера перед решением задачи снижает EL и повышает GL, способствуя построению схем, тогда как попытка решить задачу без предварительного разбора создаёт высокую EL и мало способствует обучению.

В итоге точное измерение различных типов когнитивной нагрузки даёт образовательным исследователям и разработчикам учебных программ ценные инструменты для понимания того, почему эффективность учебных форматов различается для разных учащихся. Кроме того, анализ IL позволяет определить уровень экспертизы учащихся и отслеживать изменения их знаний с течением времени (при повторных измерениях). Это открывает возможности для создания более эффективных и персонализированных обучающих сред, учитывающих индивидуальные особенности и потребности обучающихся.

Исследование Huang Y-T, Hsu C-C, Wang T-H анализирует влияние дизайна загрузочных интерфейсов VR на восприятие времени, эмоции и когнитивную нагрузку через призму модели и теории SOR. Методология включает дизайн для отдельных испытуемых с латинским квадратом для контроля порядка стимулов; выборка - 34 участника (20–34 лет, с игровым опытом) использовали гарнитуру HP Reverb G2 Omnicept с физиологическими датчиками. Мультимодальный сбор данных объединял анкеты (14-пунктная шкала Лайкерта для эмоций, субъективные оценки времени) и объективные физиологические показатели. Независимые переменные: тип интерфейса (интерактивный/неинтерактивный), длительность ожидания (15/30/60 с) и интенсивность визуальной стимуляции (наличие/отсутствие динамических элементов) [Huang, Hsu, Wang, 2025].

Результаты подтвердили ключевую роль интерактивности: интерактивные интерфейсы сокращают воспринимаемое время ожидания (особенно при 60 с) и повышают положительные эмоции. Визуальная стимуляция действовала дифференцированно:

В интерактивных интерфейсах снижала негативные эмоции, но не влияла на восприятие времени или когнитивную нагрузку;

В неинтерактивных - уменьшала когнитивную нагрузку и улучшала эмоции, не затрагивая восприятие времени.

Наименьшая когнитивная нагрузка зафиксирована в неинтерактивных интерфейсах без стимуляции (0,521) и в интерактивных с минимальными деталями (0,54). Положительные эмоции максимальны в интерактивных интерфейсах с детализацией среды (3,54 против 2,85 в неинтерактивных без стимуляции), отрицательные - минимальны в интерактивных условиях (1,75–1,89 против 2,01–2,51 в неинтерактивных) [Hou et al., 2025].

Анализируя, можно заметить тонкую взаимосвязь интерактивности и стимуляции: интерактивные элементы (мини-игры, 3D-исследования) снижают фрустрацию при ожидании за счёт отвлечения внимания, а умеренная визуальная стимуляция в неинтерактивных интерфейсах (динамичный фон) уменьшает когнитивную нагрузку. Однако избыточная сложность интерактивных компонентов грозит перегрузкой, требуя сбалансированного дизайна.

Теоретически работа расширяет теорию «стимул-организм-реакция» на VR-ожидание и эмпирически подтверждает модель распределение внимания напрямую влияет на восприятие времени в иммерсивных средах.

Практические рекомендации:

- делать акцент на интерактивности при длительном ожидании (>60 с) для сокращения субъективного времени и улучшения эмоций;
- применять умеренную визуальную стимуляцию в неинтерактивных экранах для снижения когнитивной нагрузки;
- избегать чрезмерной детализации интерактивных элементов во избежание перегрузки.

Ограничения: небольшая выборка ($n = 34$) и фокус на одном жанре (стрельба из лука), что снижает обобщаемость. Перспективы - изучение мультимодальной стимуляции (слуховой, тактильной), адаптивных интерфейсов и межжанровых сравнений для совершенствования принципов дизайна VR. Исследование углубляет понимание когнитивных нагрузок в иммерсивных средах и связывает выбор дизайна с психологическими рисками и адаптивными стратегиями, повышающими благополучие пользователей [Döllinger, Wienrich, Latoschik, 2021].

Иное анализируемое исследование, содержит всесторонний анализ когнитивных нагрузок в условиях погружения в виртуальную реальность (VR), рассматривая как связанные с этим риски, так и потенциальные адаптивные стратегии с точки зрения общей психологии. Исследование особенно актуально, учитывая недавнее распространение доступных по цене и высокопроизводительных гарнитур виртуальной реальности, которые расширили возможности применения иммерсивных технологий в образовании, тренингах, развлечениях и фитнесе.

Ключевое различие проводится между активной/реактивной модуляцией ЭЭГ (когда пользователи непосредственно управляют виртуальной средой) и пассивным/неявным контролем ИМК (когда контролируется когнитивное или эмоциональное состояние пользователя, чтобы повлиять на вспомогательные аспекты взаимодействия). Утверждается, что последний вариант более практичен для долгосрочной интеграции в системы виртуальной реальности, поскольку он менее чувствителен к ошибкам декодирования и меньше отвлекает пользователей [Ihme et al., 2018].

Это различие напрямую влияет на адаптивные стратегии управления когнитивной нагрузкой в условиях погружения.

Что касается рисков, то исследование выявило несколько серьезных проблем:

- Индивидуальные различия в моделях мозговой активности, вероятно, обусловлены различным объемом памяти, когнитивными способностями, уровнем возбуждения, снижением бдительности или эффектами усталости;
- ЭМГ-искажение ЭЭГ-сигналов из-за напряжения мышц головы, что затрудняет оценку когнитивной нагрузки;
- Артефакты, возникающие при резких движениях и использовании дисплея, установленного на голове;
- Симулятор опасен для здоровья при длительном воздействии;
- Проблемы с производительностью, связанные с активными проектами BCI (Интерфейс «мозг — компьютер»), которые требуют значительного обучения пользователей и основаны на неестественных или навязчивых стимулах.

С точки зрения адаптивных стратегий, исследование демонстрирует эффективность пассивного ЭЭГ-мониторинга для оценки когнитивной нагрузки. В эксперименте приняли участие 15 участников (в возрасте от 18 до 35 лет), которые выполняли адаптированное задание

n-back в виртуальной среде с использованием гарнитуры HTC VIVE. Цветные шары были представлены на виртуальном подиуме, и участники должны были переместить их в целевые емкости, руководствуясь правилами подбора цветов, соответствующими различным уровням [Döllinger, Wienrich, Latoschik, 2021].

Изучая и анализируя исследование можно заметить прогресс в методологии мониторинга когнитивной нагрузки в VR посредством ЭЭГ.

Результаты подтверждают возможность определения трёх уровней рабочей нагрузки по электрической активности мозга.

Среднее выполнение заданий:

99,67±1,56% (n=0), 98,17±4,51% (n=1), 95,83±7,49% (n=2).

Точность классификации:

81,1% (0 против 2, случайное угадывание - 50%) и 63,9% (0 против 1 против 2, случайное угадывание - 33,3%) в низкочастотных диапазонах ЭЭГ (θ - β); после подавления ВЧ - 73,6% и 60,6% [Döllinger, Wienrich, Latoschik, 2021].

Наиболее информативные признаки для классификации - лобные β - и γ -ритмы и теменные γ -ритмы (до подавления ВЧ). Лобные каналы обеспечивают более высокую точность, что согласуется с ролью лобно-теменной сети в когнитивных процессах. Индивидуальные различия в паттернах ЭЭГ требуют субъект-специфичных моделей [Tremmel et al., 2019].

Проводя аналитику исследования можно заметить тот факт, что при возрастании сложности задач лобно-теменная сеть показывает снижение α -мощности и увеличение θ -мощности, что отражает усиление когнитивного контроля; β -активность связана с двигательной активностью, а связи α - γ и θ - γ важны для рабочей памяти.

Практические выводы: приоритет пассивного мониторинга над активным BCI для долгосрочного использования; применение мультимодальных данных (ЭЭГ + поведенческие показатели) для повышения точности; адаптация в реальном времени для предотвращения перегрузки; индивидуальная калибровка моделей; использование фильтров Хэмпея и фильтрации верхних частот для подавления артефактов.

Таким образом, исследование подтверждает возможность ЭЭГ-мониторинга когнитивной нагрузки в VR и создаёт методологическую основу для адаптивных систем, учитывающих индивидуальные различия и физиологические артефакты для повышения эффективности иммерсивного взаимодействия [Tremmel et al., 2019].

Цель учебного дизайна - оптимизировать обучение за счёт снижения степени ненужной обработки информации (посторонней когнитивной нагрузки), одновременно повышая когнитивную вовлечённость. Хотя интерактивные элементы повышают интерес и удовольствие от процесса, они могут провоцировать поверхностные стратегии обучения и снижать эффективность усвоения и переноса знаний [Makransky et al., 2020].

Даже если IVR-системы не нацелены специально на гедоническую вовлечённость, учащиеся могут быть перегружены из-за высокой агентности и ощущения присутствия.

Важным внешним фактором, который необходимо учитывать, является уровень предварительного опыта учащегося с IVR. Эффект новизны быстро проходит и не может заменить методическую поддержку. Иммерсивные среды сильно увлекают, но и предъявляют высокие когнитивные требования из-за высокого уровня присутствия, что может затруднять саморегулируемое обучение, если в уроке не предусмотрены естественные возможности для рефлексии.

При разработке учебных инструментов для иммерсивных сред (IVR) критически важно опираться на проверенные принципы учебного дизайна и генеративные стратегии обучения,

адаптированные к специфике виртуальной реальности.

Среди ключевых принципов выделяются следующие:

- принцип согласованности, предполагающий исключение нерелевантного материала, который провоцирует гедоническую активность, но не способствует достижению учебных целей;
- принцип сигнализации, помогающий учащимся фокусировать внимание на ключевых элементах контента без снижения ощущения присутствия в виртуальной среде;
- предварительное обучение, предусматривающее специальную подготовку учащихся перед погружением в IVR для снижения посторонней когнитивной нагрузки;
- сегментация, подразумевающая подачу мультимедийного контента небольшими управляемыми частями - это позволяет учащимся контролировать темп обучения и лучше усваивать информацию;
- модальный принцип рекомендуемый использовать устную речь вместо текста в мультимедийных сообщениях, что снижает нагрузку на зрительный канал восприятия и улучшает понимание материала [Mayer, Pylegard, 2014; Parong, Mayer, 2018].

Помимо базовых принципов учебного дизайна, исследования подтверждают эффективность генеративных стратегий обучения в контексте IVR. В частности, суммирование способствует лучшему усвоению фактических и концептуальных знаний, а также повышает удержание декларативных знаний после завершения виртуальной симуляции. Ещё одной действенной стратегией является воплощение, которое помогает развивать процедурные знания и облегчает их перенос в реальные ситуации после работы с IVR-симуляцией [Mayer, Makransky, Parong, 2023].

На основе этих данных можно сформулировать основные рекомендации для проектирования учебных инструментов в иммерсивных средах: во-первых, необходимо максимально использовать уникальные преимущества IVR - глубокое погружение, высокую достоверность представления информации и возможность точного контроля обучающих факторов; во-вторых, следует целенаправленно усиливать ощущение присутствия и агентности пользователя, но при этом тщательно учитывать уровень когнитивной нагрузки, чтобы избежать перегрузки; в-третьих, важно предусматривать встроенные механизмы саморегулирования - например, возможность приостановить симуляцию, повторить этап или получить дополнительные пояснения; и, наконец, в-четвёртых, нужно последовательно применять описанные принципы учебного дизайна и генеративные стратегии, адаптируя их к особенностям иммерсивной среды для достижения максимальной эффективности обучения.

Выводы

Виртуальная реальность (VR) представляет собой не просто технологическое новшество, а преобразующую среду, меняющую способы взаимодействия человека с цифровыми пространствами. Она позволяет создавать иммерсивные, безопасные и достоверные симуляции реальных обучающих сред, однако современные VR-приложения зачастую предлагают унифицированные сценарии для всех пользователей без учёта индивидуальных различий - таких как когнитивные способности и эмоциональные реакции. Это приводит к когнитивной перегрузке, стрессу и фрустрации, что снижает эффективность обучения и вовлечённость пользователей. В основе понимания этих проблем лежит теория когнитивной нагрузки, выделяющая три её типа: внутреннюю, зависящую от сложности задачи и уровня знаний учащегося; постороннюю, вызванную неэффективными элементами учебных материалов,

отвлекающими внимание (в иммерсивных VR-средах EL может повышаться из-за избыточной свободы действий или отвлекающих деталей); и релевантную, создаваемую полезными элементами обучения, способствующими формированию когнитивных схем и глубокому усвоению материала.

Проблемы измерения когнитивной нагрузки связаны с разнообразием и недостаточной валидацией шкал оценки, низкой надёжностью данных из-за использования одного пункта по шкале Лайкерта, ограничением точности из-за малого числа категорий в шкале, а также индивидуальным характером нагрузки - один и тот же элемент может быть GL для одного учащегося и EL для другого. Для решения этих проблем разрабатываются адаптивные VR-системы, динамически регулирующие сложность задач и механизмы обратной связи на основе реального состояния пользователя: они предотвращают когнитивную перегрузку и снижают стресс с помощью машинного обучения, находят применение в образовании (адаптация сложности для оптимизации обучения), здравоохранении (неинвазивное управление болью или снижение стресса) и других сферах.

Существуют два основных подхода к адаптации в VR: использующий предопределённые эвристики для изменения параметров VR (сложность задач, особенности окружения, механика взаимодействия), интегрирующий физиологические и поведенческие данные для адаптации опыта - такие модели используют сигналы (ЭЭГ, отслеживание взгляда, сердечный ритм), чтобы определить состояние пользователя и соответствующим образом изменить среду. При этом вычислительные модели для адаптации делятся на прямую физиологическую адаптацию (использование физиологических сигналов в реальном времени для немедленных изменений в среде - например, изменение освещения или звукового сопровождения на основе электродермальной активности) и адаптацию на основе ML (более продвинутые модели, прогнозирующие состояния пользователя и адаптирующие опыт), которые пока редки, особенно в области мультимодального распознавания эмоций и систем с учётом конфиденциальности данных.

Физиологические сигналы, такие как вариабельность сердечного ритма (BCR), расширение зрачков и фиксация взгляда, коррелируют с высокой когнитивной нагрузкой и служат ценными индикаторами для адаптации в реальном времени: расширение зрачков и длительные фиксации взгляда связаны с высокой нагрузкой, а снижение BCR - со стрессом и высокой рабочей нагрузкой. Дизайн интерфейсов также играет ключевую роль: интерактивные интерфейсы сокращают воспринимаемое время ожидания (особенно при длительных паузах) и вызывают более позитивные эмоции; визуальная стимуляция в интерактивных интерфейсах снижает негативные эмоции, но слабо влияет на восприятие времени или когнитивную нагрузку; в неинтерактивных интерфейсах умеренная визуальная стимуляция снижает когнитивную нагрузку и улучшает эмоциональные реакции, а простота дизайна может снижать умственные усилия (наименьшая когнитивная нагрузка наблюдается в неинтерактивных интерфейсах без визуальной стимуляции и в интерактивных с минимальными деталями).

При разработке иммерсивных сред важно придерживаться принципов учебного дизайна: принципа согласованности (исключение нерелевантного материала), принципа сигнализации (помощь в фокусировке внимания на ключевых элементах), предварительного обучения (подготовка учащихся перед погружением в VR), сегментации (подача контента небольшими частями) и модального принципа (использование устной речи вместо текста). Генеративные стратегии обучения в контексте VR также показывают эффективность: суммирование улучшает усвоение фактических и концептуальных знаний, а воплощение способствует развитию процедурных знаний и их переносу.

Практические рекомендации для разработчиков VR-систем включают: фокусировку на преимуществах VR (погружение, достоверность представления и контроль факторов), усиление ощущения присутствия и агентности с учётом когнитивной нагрузки, предусматривание механизмов саморегулирования в сценариях иммерсивного обучения, применение проверенных принципов учебного дизайна и генеративных стратегий, адаптированных к специфике VR, приоритет пассивного мониторинга (например, через ЭЭГ) перед активным управлением для долгосрочной применимости, использование мультимодальных данных (ЭЭГ + поведенческие метрики) для повышения точности, внедрение адаптации в реальном времени на основе оценок нагрузки для предотвращения перегрузки и учёт индивидуальной калибровки для учёта персональных различий.

Важным аспектом остаётся конфиденциальность данных: сбор и обработка физиологических данных в реальном времени вызывают опасения по поводу безопасности, согласия пользователей и потенциального неправомерного использования информации, поэтому разрабатываются методы абстракции признаков (например, энтропия взгляда), снижающие риски для конфиденциальности при сохранении производительности модели. В итоге развитие адаптивных VR-систем с учётом когнитивной нагрузки, эмоциональных реакций и конфиденциальности данных открывает новые возможности для создания персонализированных и эффективных обучающих сред, способных улучшить результаты обучения и повысить удовлетворённость пользователей.

Библиография

1. Изунтар Ю. и др. К адаптивной системе виртуальной реальности для серьёзной игры в целях двигательной реабилитации на основе распознавания эмоций по лицу // Международная конференция по системам кибербезопасности и конфиденциальности на основе искусственного интеллекта (AI-CSP), 2021. IEEE, 2021. С. 1-5.
2. Макрански Г. и др. Погружение в виртуальную реальность повышает заинтересованность, но не улучшает усвоение материала при использовании научной симуляции; генеративные стратегии обучения способствуют усвоению в иммерсивной виртуальной реальности // Журнал педагогической психологии. 2020. Т. 113, № 4. С. 719-735. DOI: 10.1037/edu0000473.
3. Майер Р.Э., Макрански Г., Паронг Дж. Перспективы и подводные камни обучения в иммерсивной виртуальной реальности // Международный журнал взаимодействия человека и компьютера. 2023. Т. 39. С. 2229-2238.
4. Майер Р.Э., Пайлегард К. Принципы управления основной обработкой информации в мультимедийном обучении: принципы сегментирования, предварительного обучения и модальности // Кембриджский справочник по мультимедийному обучению / под ред. Р. Майера. 2-е изд. Нью-Йорк: Издательство Кембриджского университета, 2014. С. 316-345.
5. Baldini A., Patron E., Gentili C. и др. Novel VR-based Biofeedback systems: a comparison between heart rate variability - and electrodermal activity-driven approaches // IEEE Transactions on Affective Computing. 2024.
6. Bigonah M., Jamshidi F., Pant A. и др. A Systematic Review of Extended Reality (XR) Technologies in Agriculture and Related Sectors (2022–2024) // IEEE Access. 2025.
7. Chiossi F., Ou C., Mayer S. Optimizing Visual Complexity for Physiologically-Adaptive VR Systems: Evaluating a Multimodal Dataset using EDA, ECG and EEG Features // Proceedings of the 2024 International Conference on Advanced Visual Interfaces. 2024. P. 1-9.
8. Dey A., Chatburn A., Billingham M. Exploration of an EEG-based cognitively adaptive training system in virtual reality // 2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR). IEEE, 2019. P. 220-226.
9. Döllinger N., Wienrich C., Latoschik M.E. Challenges and Opportunities of Immersive Technologies for Mindfulness Meditation: A Systematic Review // Frontiers in Virtual Reality. 2021. Vol. 2. Art. 644683. DOI: 10.3389/frvir.2021.644683.
10. Eckert M., Habets E.A.P., Rummukainen O.S. Cognitive load estimation based on pupillometry in virtual reality with uncontrolled scene lighting // 2021 13th International Conference on Quality of Multimedia Experience (QoMEX). IEEE, 2021. P. 73-76.
11. Gomes P.V. и др. The Use of Artificial Intelligence in Interactive Virtual Reality Adaptive Environments with Real Time Biofeedback Applied to Phobias Psychotherapy // VI Congreso Xove TIC: impulsando el talento científico,

- Octubre 2023, A Coruña. Universidade da Coruña, Servizo de Publicacións, 2023. P. 275-279.
12. Hou Y. и др. Cognitive load classification of mixed reality human computer interaction tasks based on multimodal sensor signals // *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Art. 13732. DOI: 10.1038/s41598-025-98891-3.
 13. Huang Y.-T., Hsu C.-C., Wang T.-H. Влияние дизайна загрузочных интерфейсов VR на восприятие времени, эмоции и когнитивную нагрузку // *Frontiers in Virtual Reality*. 2025.
 14. Ihme K. и др. Recognizing Frustration of Drivers From Face Video Recordings and Brain Activation Measurements With Functional Near-Infrared Spectroscopy // *Frontiers in Human Neuroscience*. 2018. Vol. 12. Art. 327. DOI: 10.3389/fnhum.2018.00327.
 15. Kreibitz S.D. Autonomic nervous system activity in emotion: A review // *Biological Psychology*. 2010. Vol. 84, № 3. P. 394-421.
 16. Kritikos J., Alevizopoulos G., Koutsouris D. Personalized virtual reality human-computer interaction for psychiatric and neurological illnesses: a dynamically adaptive virtual reality environment that changes according to real-time feedback from electrophysiological signal responses // *Frontiers in Human Neuroscience*. 2021. Vol. 15. Art. 596980.
 17. Lee J.Y. и др. Measuring cognitive load in virtual reality training via pupillometry // *IEEE Transactions on Learning Technologies*. 2023.
 18. Lima E.S. de, Silva B.M.C., Galam G.T. Adaptive virtual reality horror games based on Machine learning and player modeling // *Entertainment Computing*. 2022. Vol. 43. Art. 100515.
 19. Moldoveanu A. и др. Immersive phobia therapy through adaptive virtual reality and biofeedback // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, № 18. Art. 10365.
 20. Moon H. и др. The influence of olfactory and visual stimuli on students' performance and mood in virtual reality environment // *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. Los Angeles, CA: SAGE Publications, 2023. Vol. 67. P. 2441-2446.
 21. Nasri M. Towards Intelligent VR Training: A Physiological Adaptation Framework for Cognitive Load and Stress Detection. Northeastern University, April 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2504.06461.
 22. Nasri M. и др. Exploring Eye Tracking to Detect Cognitive Load in Complex Virtual Reality Training // 2024 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct). IEEE, 2024a. P. 51-54.
 23. Nasri M. и др. Designing a Virtual Reality Training Apprenticeship for Cold Spray Advanced Manufacturing // 2024 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct). IEEE, 2024b. P. 541-544.
 24. Parong J., Mayer R.E. Learning science in immersive virtual reality // *Journal of Educational Psychology*. 2018. Vol. 110, № 6. P. 785-797. DOI: 10.1037/edu000.
 25. Salminen M. и др. Медитация в виртуальной реальности с нейрофидбэком: влияние на ощущение присутствия, глубину медитации и мозговые колебания // *Поведение и информационные технологии*. 2024. Т. 43, № 12. С. 2750-2764.
 26. Tremmel C. и др. Оценка когнитивной нагрузки в интерактивной среде виртуальной реальности с использованием ЭЭГ // *Границы нейронауки человека*. 2019. Т. 13. Арт. 401. DOI: 10.3389/fnhum.2019.00401.
 27. Uyan U., Celikcan U. CDMS: система реального времени для снижения киберболезни с помощью ЭЭГ-направляемой адаптации факторов VR-контента // *Дисплеи*. 2024. Т. 83. Арт. 102704.
 28. Williams A.M. и др. Иммерсивный биофидбэк в реальном времени с усиленными ожиданиями улучшает моторное обучение: исследование осуществимости // *Журнал спортивной реабилитации*. 2022. Т. 31, № 8. С. 1023-1030.

Cognitive Load in Immersive Environments: Risks and Adaptation Strategies

Makar V. Veselov

Master's Student,
Siberian Federal University,
660041, 79/3, Svobodnyy ave., Krasnoyarsk, Russian Federation;
e-mail: pepegamonkaomega@gmail.com

Abstract

The article is devoted to the analysis of the risks of cognitive overload when using immersive environments, in particular virtual reality (VR) technologies, in education and professional training.

The focus is on the problem of unified VR solutions that do not take into account individual user differences (cognitive abilities, emotional background, level of cognitive load). The paper reveals the mechanisms of cognitive overload occurrence in VR environments based on cognitive load theory (intrinsic, extraneous, and germane load). Physiological markers of overload (heart rate variability, pupil dilation, EEG) and their connection with emotional reactions (stress, frustration) are described. The author conducts a systematic literature review to assess methods for measuring cognitive load and approaches to adapting VR environments (rule-based and machine learning-based). Strategies for personalizing learning are proposed: the use of multimodal data, real-time adaptation, and consideration of the confidentiality of physiological data. The practical significance of the study lies in developing recommendations for designing adaptive VR systems in education and healthcare, allowing for increased engagement, reduced stress, and optimization of the learning process considering individual user characteristics.

For citation

Veselov M.V. (2026) Kognitivnye nagruzki v immersivnykh sredakh: riski i adaptatsionnye strategii [Cognitive Load in Immersive Environments: Risks and Adaptation Strategies]. *Psikhologiya. Istoriko-kriticheskie obzory i sovremennye issledovaniya* [Psychology. Historical-critical Reviews and Current Researches], 15 (4A), pp. 23-37. DOI: 10.34670/AR.2026.48.71.006

Keywords

Virtual reality (VR), immersive environments, cognitive load, cognitive overload, adaptation in VR, physiological signals, cognitive load theory, machine learning.

References

1. Baldini, A., Patron, E., Gentili, C., et al. (2024). Novel VR-based biofeedback systems: A comparison between heart rate variability- and electrodermal activity-driven approaches. *IEEE Transactions on Affective Computing*.
2. Bigonah, M., Jamshidi, F., Pant, A., et al. (2025). A systematic review of extended reality (XR) technologies in agriculture and related sectors (2022–2024). *IEEE Access*.
3. Chiossi, F., Ou, C., & Mayer, S. (2024). Optimizing visual complexity for physiologically-adaptive VR systems: Evaluating a multimodal dataset using EDA, ECG and EEG features. In *Proceedings of the 2024 International Conference on Advanced Visual Interfaces* (pp. 1-9).
4. Dey, A., Chatburn, A., & Billingham, M. (2019). Exploration of an EEG-based cognitively adaptive training system in virtual reality. In *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)* (pp. 220-226). IEEE.
5. Döllinger, N., Wienrich, C., & Latoschik, M. E. (2021). Challenges and opportunities of immersive technologies for mindfulness meditation: A systematic review. *Frontiers in Virtual Reality*, 2, Article 644683. <https://doi.org/10.3389/frvir.2021.644683>
6. Eckert, M., Habets, E. A. P., & Rummukainen, O. S. (2021). Cognitive load estimation based on pupillometry in virtual reality with uncontrolled scene lighting. In *2021 13th International Conference on Quality of Multimedia Experience (QoMEX)* (pp. 73-76). IEEE.
7. Gomes, P. V., et al. (2023). The use of artificial intelligence in interactive virtual reality adaptive environments with real time biofeedback applied to phobias psychotherapy. In *VI Congreso Xove TIC: impulsando el talento científico, Octubre 2023, A Coruña* (pp. 275-279). Universidade da Coruña, Servizo de Publicacións.
8. Hou, Y., et al. (2025). Cognitive load classification of mixed reality human computer interaction tasks based on multimodal sensor signals. *Scientific Reports*, 15, Article 13732. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-98891-3>
9. Huang, Y.-T., Hsu, C.-C., & Wang, T.-H. (2025). The impact of VR boot interface design on time perception, emotions, and cognitive load. *Frontiers in Virtual Reality*.
10. Ihme, K., et al. (2018). Recognizing frustration of drivers from face video recordings and brain activation measurements with functional near-infrared spectroscopy. *Frontiers in Human Neuroscience*, 12, Article 327. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00327>
11. Izuntar, Y., et al. (2021). Towards an adaptive virtual reality system for serious gaming for the purpose of motor rehabilitation based on facial emotion recognition. In *International Conference on Cybersecurity and Privacy Systems*

-
- based on Artificial Intelligence (AI-CSP), 2021 (pp. 1-5). IEEE.
12. Kreibig, S. D. (2010). Autonomic nervous system activity in emotion: A review. *Biological Psychology*, 84(3), 394-421.
 13. Kritikos, J., Alevizopoulos, G., & Koutsouris, D. (2021). Personalized virtual reality human-computer interaction for psychiatric and neurological illnesses: A dynamically adaptive virtual reality environment that changes according to real-time feedback from electrophysiological signal responses. *Frontiers in Human Neuroscience*, 15, Article 596980.
 14. Lee, J. Y., et al. (2023). Measuring cognitive load in virtual reality training via pupillometry. *IEEE Transactions on Learning Technologies*.
 15. Lima, E. S. de, Silva, B. M. C., & Galam, G. T. (2022). Adaptive virtual reality horror games based on machine learning and player modeling. *Entertainment Computing*, 43, Article 100515.
 16. Makransky, G., et al. (2020). Immersion in virtual reality increases interest, but does not improve the assimilation of material when using scientific simulation; generative learning strategies contribute to assimilation in immersive virtual reality. *Journal of Educational Psychology*, 113(4), 719-735. <https://doi.org/10.1037/edu0000473>
 17. Mayer, R. E., Makransky, G., & Parong, J. (2023). Prospects and pitfalls of learning in immersive virtual reality. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 39, 2229-2238.
 18. Mayer, R. E., & Pylegard, K. (2014). Principles of managing basic information processing in multimedia learning: Principles of segmentation, pre-learning and modality. In R. Mayer (Ed.), *Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (2nd ed., pp. 316-345). Cambridge University Press.
 19. Moldoveanu, A., et al. (2023). Immersive phobia therapy through adaptive virtual reality and biofeedback. *Applied Sciences*, 13(18), Article 10365.
 20. Moon, H., et al. (2023). The influence of olfactory and visual stimuli on students' performance and mood in virtual reality environment. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 67, pp. 2441-2446). SAGE Publications.
 21. Nasri, M. (2025). Towards intelligent VR training: A physiological adaptation framework for cognitive load and stress detection. Northeastern University. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2504.06461>
 22. Nasri, M., et al. (2024a). Exploring eye tracking to detect cognitive load in complex virtual reality training. In *2024 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct)* (pp. 51-54). IEEE.
 23. Nasri, M., et al. (2024b). Designing a virtual reality training apprenticeship for cold spray advanced manufacturing. In *2024 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct)* (pp. 541-544). IEEE.
 24. Parong, J., & Mayer, R. E. (2018). Learning science in immersive virtual reality. *Journal of Educational Psychology*, 110(6), 785-797. <https://doi.org/10.1037/edu000>
 25. Salminen, M., et al. (2024). Meditating in a neurofeedback virtual reality: Effects on sense of presence, meditation depth and brain oscillations. *Behaviour & Information Technology*, 43(12), 2750-2764.
 26. Tremmel, C., et al. (2019). Estimating cognitive workload in an interactive virtual reality environment using EEG. *Frontiers in Human Neuroscience*, 13, Article 401. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00401>
 27. Uyan, U., & Celikcan, U. (2024). CDMS: A real-time system for EEG-guided cybersickness mitigation through adaptive adjustment of VR content factors. *Displays*, 83, Article 102704.
 28. Williams, A. M., et al. (2022). Immersive real-time biofeedback optimized with enhanced expectancies improves motor learning: A feasibility study. *Journal of Sport Rehabilitation*, 31(8), 1023-1030.
-