

УДК 004.946

doi:10.31799/1684-8853-2022-4-58-67

Поиск закономерностей на ЭЭС при симуляции тревожно-фобической ситуации в среде виртуальной реальности

А. Ю. Тычков^а, доктор техн. наук, профессор, orcid.org/0000-0002-2354-2895, tychkov-a@mail.ru

Д. С. Чернышов^а, инженер-программист, orcid.org/0000-0002-1604-7001

П. П. Чураков^а, доктор техн. наук, профессор, orcid.org/0000-0002-5918-732X

З. М. Юлдашев^б, доктор техн. наук, профессор, orcid.org/0000-0003-1075-3420

Н. С. Бофанова^а, канд. мед. наук, доцент, orcid.org/0000-0002-5455-4987

А. К. Алимуратов^а, канд. техн. наук, доцент, orcid.org/0000-0002-5133-2713

В. Н. Горбунов^а, канд. экон. наук, доцент, orcid.org/0000-0003-0195-0772

Р. В. Золотарев^а, инженер-программист, orcid.org/0000-0002-5614-6557

М. С. Никитин^а, инженер-программист, orcid.org/0000-0002-5708-3391

^аПензенский государственный университет, Красная ул., 40, Пенза, 440000, РФ

^бСанкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Профессора Попова ул., 5, Санкт-Петербург, 197022, РФ

Введение: эффективная и оперативная постановка диагностических заключений о наличии тревожно-фобических расстройств требует совершенствования существующих и разработки новых способов диагностики и лечения пациентов, в том числе с применением технологии виртуальной реальности. **Цель:** исследовать реакцию испытуемого на стимул, вызывающий страх, противопоставленный через сцены виртуальной реальности (нахождение на высоте). Определить маркеры на электроэнцефалографическом сигнале, ассоциированные с уровнем тревоги и восприимчивости испытуемого в среде виртуальной реальности. **Методы:** испытуемые погружались в виртуальную реальность с прохождением анкетирования самооценки, регистрации электроэнцефалографического сигнала и спектральным анализом сигналов в различных частотных диапазонах в среде статистического программирования R версии 4.1.2. **Результаты:** для проведения исследования сформирована группа испытуемых из девяти условно здоровых мужчин в возрасте от 23 до 26 лет, отрицавших хронические соматические заболевания в анамнезе, органические заболевания головного мозга. Проведено сравнение состояния покоя (эталонного значения) и состояния в среде виртуальной реальности испытуемых в момент высокой эмоциональной нагрузки (на высоте небоскреба). Полученные результаты позволяют сделать вывод, что симуляция ситуации нахождения на высоте у различных испытуемых, независимо от интенсивности проявления страха, вызывает снижение индексов альфа-, тета-, бета-ритмов и увеличение индекса дельта-ритма на электроэнцефалографическом сигнале относительно состояния покоя. Выявленные закономерности позволяют оценить уровень тревоги человека в среде виртуальной реальности. **Практическая значимость:** результаты исследований могут быть использованы при разработке новых клинических методик диагностики тревожно-фобических расстройств с применением технологии виртуальной реальности. Они позволят повысить уровень объективной оценки психоэмоционального состояния человека путем выявления объективных электрофизиологических маркеров, зарегистрированных у человека в период нахождения его в среде виртуальной реальности.

Ключевые слова – виртуальная реальность, тревожно-фобические расстройства, электроэнцефалографический сигнал.

Для цитирования: Тычков А. Ю., Чернышов Д. С., Чураков П. П., Юлдашев З. М., Бофанова Н. С., Алимуратов А. К., Горбунов В. Н., Золотарев Р. В., Никитин М. С. Поиск закономерностей на ЭЭС при симуляции тревожно-фобической ситуации в среде виртуальной реальности. *Информационно-управляющие системы*, 2022, № 4, с. 58–67. doi:10.31799/1684-8853-2022-4-58-67

For citation: Tychkov A. Yu., Chernykhov D. S., Churakov P. P., Yuldashov Z. M., Bofanova N. S., Alimuradov A. K., Gorbunov V. N., Zolotarev R. V., Nikitin M. S. Search for EEG signal patterns in simulating phobic anxiety disorder situations in a VR environment. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2022, no. 4, pp. 58–67 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2022-4-58-67

Введение

На современном этапе развития информационных технологий наблюдается тенденция глобальной цифровизации всех сфер жизнедеятельности человека, в том числе здравоохранения. Технология виртуальной реальности (ВР; Virtual Reality, VR) как инструмент развития «цифровой медицины» способен замещать или искажать информацию от органов чувств, изменяя и анализируя при этом ответные реакции организма, осуществляя взаимодействие орга-

низма с создаваемой виртуальной средой [1]. Технология ВР находит широкое применение в игровой индустрии, симуляторах различного назначения, системах медицинской диагностики и лечения пациентов. В настоящее время ВР является перспективным и динамично развивающимся направлением, особенно в области неврологии и психиатрии. ВР появилась как альтернатива создания виртуальных стимулов, близких к реальной жизни, что позволило человеку взаимодействовать с окружающей средой в различных ситуациях [2].

В настоящее время в связи с пандемией, а также сложной геополитической обстановкой в мире отмечается рост обращений за медицинской помощью к врачам-неврологам, врачам-психиатрам и психотерапевтам. У каждого четвертого жителя планеты возможно диагностировать тревожно-фобическое расстройство в связи с неблагоприятными условиями среды и ростом стрессовых факторов.

Для постановки диагноза и оценки тяжести состояния пациентов врачами применяется субъективный сбор анамнеза, а также интерпретация психометрических шкал, которые имеют субъективный характер. В настоящее время отсутствие объективной инструментальной диагностики тревожно-фобических расстройств может приводить к необъективной интерпретации результатов и, как следствие, неправильной постановке диагноза [3, 4].

Электроэнцефалография — важный метод изучения нейрофизиологических механизмов тревожно-фобических расстройств, который позволяет оценивать текущее функциональное состояние различных отделов коры головного мозга.

Для эффективной и оперативной постановки диагностических заключений о наличии тревожно-фобических расстройств необходимо совершенствовать существующие и разрабатывать новые способы диагностики и лечения, в том числе с применением ВР.

Виртуальная реальность в диагностике и лечении тревожно-фобических расстройств

Виртуальная реальность — это тип человеко-компьютерного интерфейса, который позволяет пользователям взаимодействовать с компьютерами в режиме реального времени и погружаться в среду, созданную компьютерами. Пользователями ВР являются более 40 млн человек в мире (2019 — 35 млн чел., 2020 — 42 млн чел.). Технология ВР прошла длинный путь от первых экспериментов в 50-х годах XX века до современных беспроводных шлемов в 20-х годах XXI века [5].

Применение ВР позволяет передавать аудиовизуальные переживания более реалистично, чем традиционные терапевтические технологии, и обеспечивает безопасную и контролируемую среду. Сценарий настраивается в соответствии с состоянием пациента таким образом, чтобы страх, радость и другие эмоции пациента могли быть полностью выражены [6].

Около 12 % населения земного шара (порядка миллиарда человек) имеют тревожно-фобические расстройства. Тревожно-фобические рас-

стройства [7] — группа расстройств, в клинической картине которых преимущественно встречается тревога, страх конкретных ситуаций или объектов, которые не являются опасными.

Согласно классификации тревожно-фобических расстройств [7], выделяются:

1) агорафобия — страх перед посещением общественных мест, магазинов, транспорта, страх перед выходом на улицу;

2) социальные фобии — неконтролируемый страх ситуаций, которые связаны с действиями в присутствии других людей, а также страх негативной оценки со стороны других людей;

3) специфические фобии — навязчивый страх определенных животных (например, собак, кошек, пауков, змей), людей (клоунов, дантистов, врачей и пр.), окружающей среды (темных мест, гроз, высоких мест и т. п.) или ситуаций (таких как летать на самом самолете, ехать на поезде, находиться в очень замкнутом пространстве, страх лифтов).

Исследования, посвященные вопросу применения технологии ВР в лечении пациентов с тревожно-фобическими расстройствами, малочисленны [8–14], работы, в которых виртуальную среду использовали как диагностический инструмент, — единичны [13, 14].

Экспозиционная терапия, несмотря на доказанную эффективность как метода воздействия на пациентов с тревожно-фобическим расстройством, имеет ряд недостатков: данный вид терапии требует от пациента повествования о предмете или ситуации, которая вызывает страх. Этот факт приводит к низкой эмоциональной вовлеченности пациентов, потому что они, как правило, избегают любого напоминания о ситуации или объекте, который вызывает чувство неконтролируемого страха, и, как следствие, к неудовлетворительным результатам терапии.

Экспозиционная терапия тревожно-фобических расстройств с использованием технологии ВР состоит из поэтапного постепенного погружения в обстановку или ситуацию, которая вызывает страх. Со временем чувство страха становится меньше и обстановка, которая вызывала страх, становится комфортнее. Технология ВР позволяет проще погрузиться в ситуацию, потому что происходит воздействие на зрительные, слуховые, тактильные рецепторы, а не только за счет воображения человека как при работе с врачом-психотерапевтом [15].

В 2020 г. Г. Ланкон и др. [16] провели исследования в среде ВР в отношении испытуемого с тревожно-фобическим расстройством (страх перед акулами). Во время первоначальной оценки испытуемого основная проблема была связана с сильным беспокойством пребывания человека в водной среде. Когда пользователь находился

в воде, на него воздействовали образы в виде водорослей или камней, что приводило к возникновению панической атаки. Для решения данной проблемы авторы [16] погружали пользователя в сцены ВР с различными морскими млекопитающими и добивались привыкания к водной среде. Сравнение состояния испытуемого до и после применения ВР показало уменьшение сквалофобии (64,34 %), уменьшение расстройства настроения (33,33 %) и снижение тревожности.

На сегодня в области медицины для работы с тревожно-фобическими расстройствами существует множество программно-аппаратных решений, таких как C2Phobia, PSIOUS, Stim Response Virtual Reality, Virtually Better и др. Все известные программно-аппаратные комплексы ориентированы на коррекцию специфических и социальных фобий в отсутствие постоянного контроля поведения человека в режиме реального времени.

Постановка эксперимента исследования в среде ВР

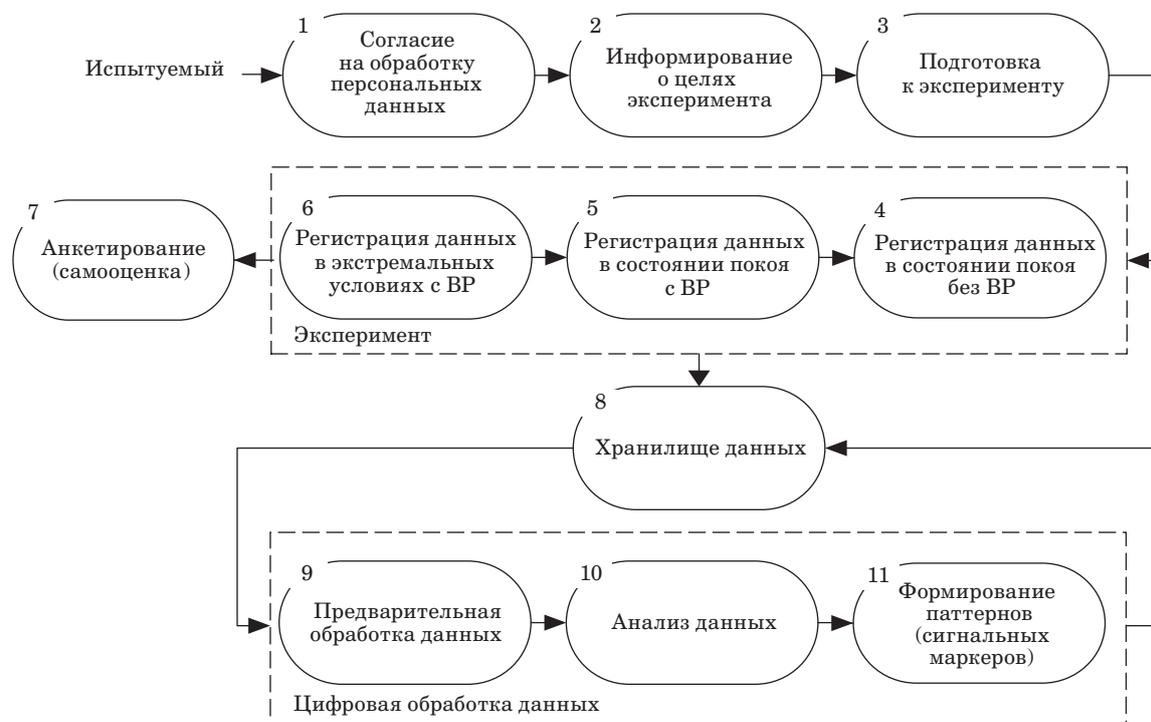
Несмотря на значительное количество готовых программно-аппаратных решений, существует необходимость в оценке состояния испытуемого на основе анализа физиологических данных.

Коллективом авторов настоящей статьи ранее разработана методика исследования тревожно-фобических расстройств в среде ВР с использованием восьмиканального электроэнцефалографа [17].

Для проведения исследования сформирована группа испытуемых из девяти условно здоровых мужчин в возрасте от 23 до 26 лет, которые отрицали хронические соматические заболевания в анамнезе, органические заболевания головного мозга. Все исследуемые дали согласие на погружение в виртуальную среду и не получали компенсации за участие. Все исследования проводились в соответствии с протоколом клинического исследования, утвержденным на заседании локального комитета по этике ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» (протокол № 8 от 29 апреля 2022 г.).

Схема эксперимента показана на рис. 1.

В целях повышения эффективности реализации методики исследования тревожно-фобических расстройств первостепенное внимание уделялось вопросу оценки состояния пользователя в среде ВР, безопасности воздействия виртуальной среды на пользователя, а также оценке его виртуального опыта. По данным литературы [18–20], погружение в виртуальную среду может сопровождаться появлением ряда побочных эффектов, которые могут проявляться в виде головной боли, головокружения, чувства тошноты, наруше-



■ **Рис. 1.** Схема исследования тревожно-фобических расстройств в среде ВР

■ **Fig. 1.** Schematic for the research into phobic anxiety disorders in the VR environment

ния координации, дезориентации в пространстве (киберболезнь или симуляторное расстройство). Причина появления данных явлений – неподвижное состояние человека и передача зрительной информации о перемещении тела пользователя в виртуальном пространстве в головной мозг, возникновение ощущения иллюзии движения и перемещения в пространстве, векции.

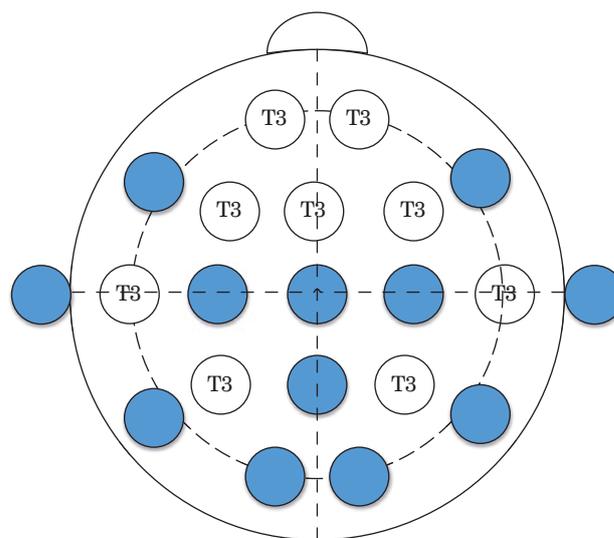
У всех исследуемых была осуществлена проверка функции зрения: все исследуемые имели нормальное зрение, у двух человек зрение до уровня нормальных показателей корректировалось с использованием контактных линз. Опыт нахождения в виртуальном пространстве имели семь участников, которые ранее не испытывали побочных эффекты нахождения в виртуальной среде. После нахождения в среде ВР всем исследуемым проведены сбор анамнеза, физикальный осмотр и неврологическое обследование врачом-неврологом, опрос по анкете SSQ с целью исключить симуляторное расстройство у пользователей, а также нейропсихологическое обследование с использованием шкалы тревоги Спилбергера – Ханина.

Для предотвращения акустической ориентации исследование проводилось в отдельном кабинете площадью 40 кв. м в условиях полной звуковой обособленности. Всем исследуемым врачом-неврологом объяснялась процедура исследования с коротким (2–3 мин) погружением в среду ВР в целях ознакомления и обучения навыкам навигации в среде виртуальной реальности (блок 3). В этот период времени испытуемый пребывал в состоянии покоя, восстанавливал дыхание, успокаивался.

Затем (блок 4) проводилась регистрация электроэнцефалографических сигналов (ЭЭС) в течение 5 мин в состоянии покоя с открытыми глазами. Затем ассистент надевал шлем ВР на испытуемого с продолжающейся записью ЭЭС для последующего анализа (блоки 5, 6). После завершения погружения в виртуальную среду все обследуемые оставались в кресле в спокойном и расслабленном состоянии еще 5 мин для контрольной записи ЭЭС, состояние также контролировал врач-невролог, проводя нейропсихологическое обследование.

Регистрация ЭЭС осуществлялась посредством электроэнцефалографа «Нейрон-спектр» по восьми отведениям. Схема расположения электродов приведена на рис. 2. В качестве последующего анализа использовались зарегистрированные ЭЭС в лобных отведениях (Fp1, Fp2). Частотное распределение ритмов ЭЭС регистрировалось в следующих диапазонах: альфа (8–12 Гц), бета (12–35 Гц), тета (4–8 Гц), дельта (0,5–4 Гц).

Электроэнцефалографический сигнал – это сигнал, регистрирующий электрическую актив-



■ **Рис. 2.** Схема расположения электродов
 ■ **Fig. 2.** Electrode layout

ность головного мозга. Кортиковая активность основана на связи и коммуникации между нейронами, что стало возможным благодаря передаче небольших электрических сигналов, называемых электрическими импульсами.

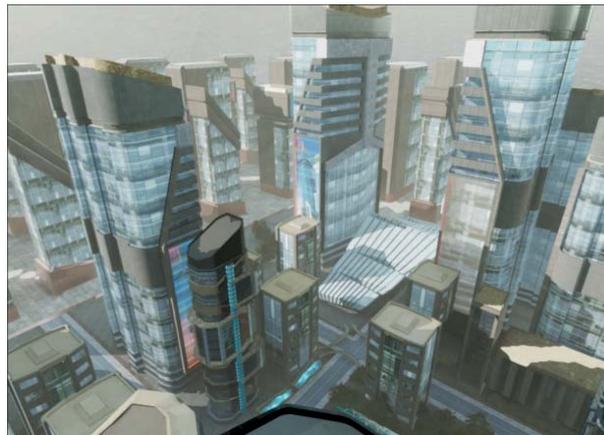
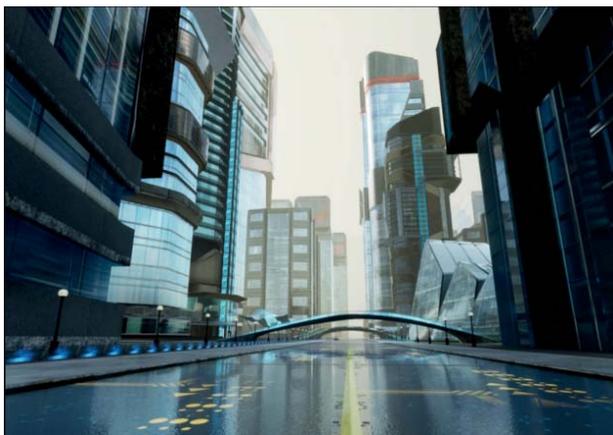
Основная задача эксперимента – продемонстрировать реакцию испытуемого на стимул, вызывающий страх, противопоставленный через сцены ВР.

После регистрации ЭЭС испытуемому предлагалось пройти анкетирование самооценки (блок 7) для субъективного заключения об уровне страха, с которым он столкнулся в сценах ВР. Результаты регистрации заносились в хранилище данных для последующего анализа и обработки результатов измерений (блоки 8–11).

Для демонстрации виртуального мира использовался шлем ВР – головной дисплей HTC VIVE Pro (включающий в себя два экрана AMOLED с диагональю 3,5" каждый), контроллеры. Персональный компьютер 32 Гб оперативной памяти DDR4, графическая карта GeForce GTX 1060 6Гб, процессор Intel Core i-3 3570. Все оборудование располагается в лаборатории «Биомедицинские и когнитивные технологии» Пензенского государственного университета.

Для проведения настоящего исследования разработана авторская сцена ВР (рис. 3) в среде моделирования Unreal Engine 4+Blender, позволяющей создать реалистичные сцены и добиться максимального эффекта погружения в виртуальную среду.

При создании сцены были использованы объекты окружения, созданные с помощью технологии фотограмметрии, что позволило добиться максимальной реалистичности сцены при малой



- *Рис. 3.* Авторская сцена ВР
- *Fig. 3.* Authoring VR scene

ресурсной стоимости внутренних компонентов. Для этого был выдержан единый стиль оформления и цветовое решение. Также учитывались такие факторы, как освещение: естественные и искусственные источники освещения, туман, дымка горизонта.

Пользователи погружались в среду виртуального города будущего, который представлял собой различные городские пейзажи с домами-небоскребами, улицами, водными пейзажами. Виртуальная сцена разработана от первого лица. Для обзора городского пейзажа необходимо пройти в лифт и нажать кнопку подъема. Пользователи за виртуальными пейзажами наблюдали из кабины лифта с прозрачными стенами, который поднимался с минимальной скоростью на значительную высоту. Управление лифтом осуществлялось с помощью кнопок, расположенных на джойстиках в руках пользователя, что активизировало моторную и сенсорную системы человека. При разработке сцены уделялось особое внимание тому, чтобы действия в виртуальной среде были простыми и интуитивно понятными. Зрительная информация, поступающая с помощью шлема ВР, содержала сигналы, исключающие резкие раздражающие факторы или провокационные действия. В завершение сцены двери лифта открывались, и пользователи оказывались на высоте города будущего, вместо пола лифта — узкая деревянная доска, по которой необходимо было пройти. Эта виртуальная сцена являясь неожиданной и непрогнозируемой для пользователя, вызывала чувство тревоги и беспокойства.

Результаты и выводы

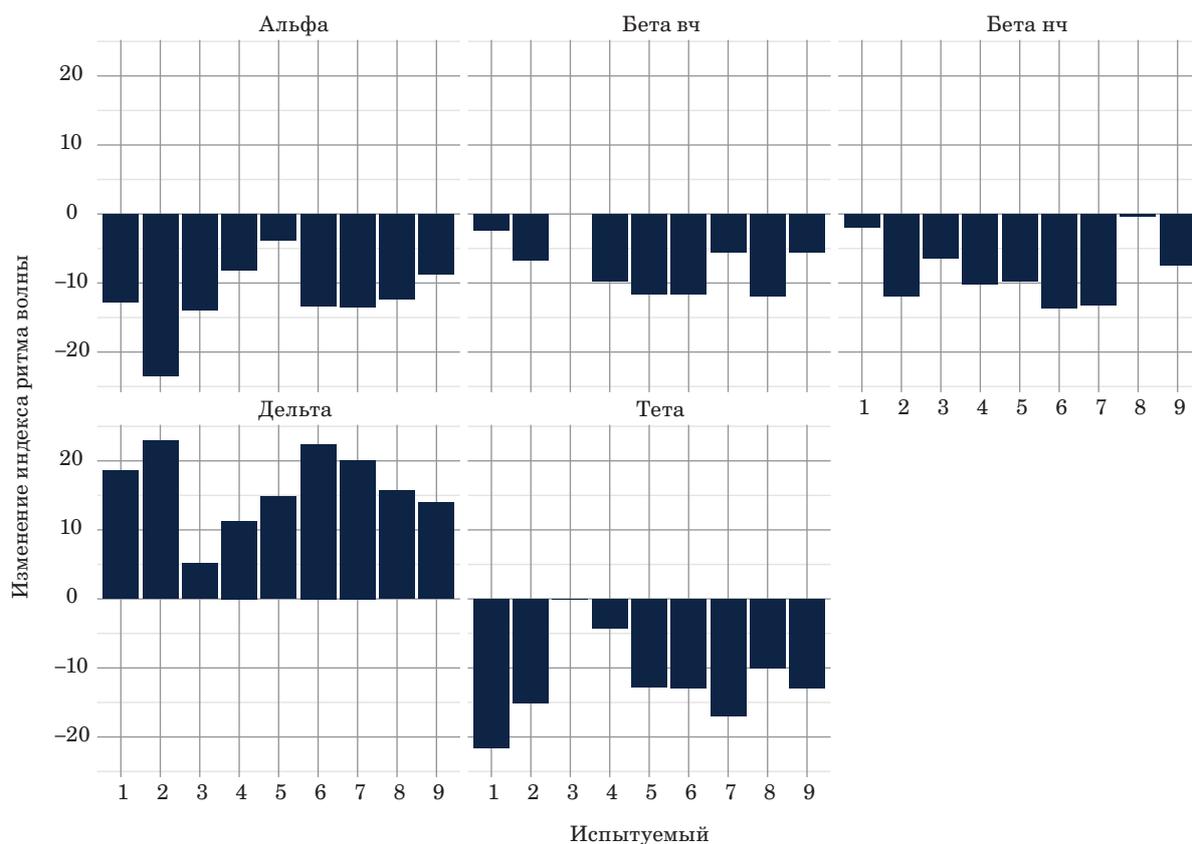
На основании эксперимента проведен спектральный анализ изменения индекса ЭЭС в раз-

личных частотных диапазонах. Анализ произведен в среде статистического программирования R версии 4.1.2 [21] с использованием свободно распространяемой интегрированной среды для разработки (integrated development environment) на языке R — RStudio 2021.09.0+351 [22]. Для обработки и визуализации данных использованы пакеты для языка R: easyalluvial, GGally, ggplot2, parcats, readxl, scales, tidyverse [23, 24].

В приведенных диаграммах (рис. 4) показаны изменения индексов ритмов волн в различных частотных диапазонах. Показатели изменения выражены в абсолютных значениях. В работе сравнивается состояние покоя (эталонное значение) и состояние, в котором испытуемый находится в ВР в период высокой эмоциональной нагрузки, на высоте небоскреба. Сравнение производится относительно значений, принятых за эталонные (состояние покоя испытуемого).

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что симуляция ситуации нахождения на высоте у различных пользователей, независимо от интенсивности проявления страха, вызывает снижение индексов альфа-, тета-, бета-ритмов и увеличение индекса дельта-ритма ЭЭС относительно состояния покоя.

Диаграмма распределения изменения (выраженного в абсолютных значениях) индексов ритмов волн (рис. 5) позволяет количественно оценить тенденции изменения индексов ритмов волн, ширина диаграммы коррелирует с частотностью. Альфа-ритм (α) снижается в пределах от 3,9 до 23,5 %. Расширение на диаграмме при $\alpha \in [-11\%; -16\%]$ показывает, что изменение индекса ритма волн в альфа-диапазоне среди испытуемых наиболее часто лежит в данных пределах. У наиболее восприимчивых к страху высоты испытуемых изменение альфа-ритма достигает максимальных значений $\Delta\alpha \in [-16\%;$



■ **Рис. 4.** Диаграммы изменения индексов ритмов волн
 ■ **Fig. 4.** Diagrams illustrating changes in wave rhythm indices



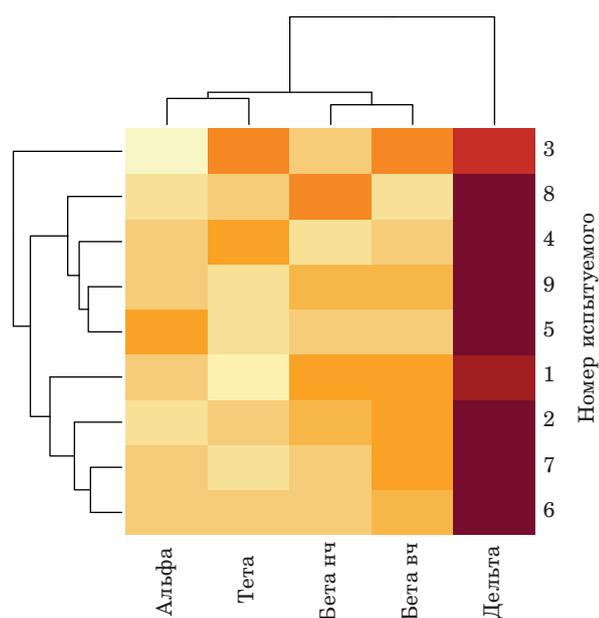
■ **Рис. 5.** Скрипичная диаграмма, %
 ■ **Fig. 5.** Violin plot, %

-23,5 %]. Альфа-ритм на ЭЭС указывает на процесс торможения нервной системы. Уменьшение альфа-индекса альфа-ритма в ходе исследования сигнализирует о возбуждении нервной системы испытуемых. Изменение индекса тета-ритма (θ) коррелирует с изменением индекса альфа, кото-

рое составляло [-14 %; -16 %]. Изменение индекса бета (β) равномерно распределено в пределах от десятой части процента до десяти процентов. Колебания дельта-ритма (δ) наблюдаются на ЭЭС при некоторых формах стресса. Дельта-ритм – единственный ритм, индекс которого увеличивался в ходе испытания. Испытуемые при контакте с «виртуальной высотой» испытывали чувство тревоги. У испытуемых с наименьшим проявлением чувства тревоги на высоте $\Delta\delta \in [5 \%; 12 \%;]$, с наиболее выраженным проявлением чувства тревоги $\Delta\delta \in [12 \%; 23 \%;]$.

Для выявления структуры в данных использовано графическое представление данных в виде тепловой карты (рис. 6), на которой каждый столбец представляет собой переменную (волны различных частотных диапазонов на ЭЭС), а каждая строка – наблюдение, интенсивностью цвета показаны величины изменений индексов ритмов волн.

Порядок строк и столбцов на тепловой карте был изменен переупорядочиванием как переменных, так и наблюдений с использованием алгоритма кластеризации: вычислено расстояние между каждой парой строк и столбцов и наблюдения упорядочены по их сходству. По значе-



■ **Рис. 6.** Тепловая карта изменений индексов ритмов волн у испытуемых с кластеризацией и упорядочиванием по наблюдениям и переменным

■ **Fig. 6.** Heat map illustrating changes in wave rhythm indices in subjects with clustering and ordering by observations and variables

ниям переменных испытуемые разделились на две группы (в 1-й группе испытуемые 1, 2, 3, 7; во 2-й группе испытуемые 3, 4, 5, 8, 9). Наблюдается сходство между изменениями ритмов волн альфа и тета, а также бета нч и бета вч.

С помощью методики Ч. Д. Спилбергера по выявлению личностной и ситуационной тревожности (адаптированной Ю. Л. Ханиным) врач определял уровень выраженности тревожности у испытуемых. Показатель ситуационной тревожности составил $46,3 \pm 5,1$, личностной тревожности — $54,6 \pm 5,6$.

Таким образом, у всех исследуемых условно здоровых испытуемых после погружения в среду ВР уровень тревожности как ситуационной, так

и личностной был выше нормальных показателей.

Полученные результаты позволяют предположить гипотезу о наличии объективных электрофизиологических маркеров, которые ассоциированы с уровнем тревоги у пользователя. Впоследствии данные показатели можно использовать в качестве диагностики тревожно-фобических расстройств у человека, находящегося в среде ВР. Это позволит отойти от субъективной оценки по шкалам психоэмоционального состояния человека (ответы на вопросы могут быть даны необъективно), заменив их оценкой объективных электрофизиологических маркеров, зарегистрированных в среде ВР.

Заключение

Проведенное исследование — одно из первых в оценке влияния технологий ВР на психоэмоциональное состояние человека. Определены объективные электрофизиологические маркеры, ассоциированные с уровнем тревоги у пользователя, которые подтверждают наличие специфических отклонений функционального состояния коры головного мозга у человека с чувством тревоги при нахождении на высоте в виртуальной среде.

В последующих исследованиях необходимо изучить вопрос влияния эффекта привыкания пользователя при нахождении в среде ВР, происходят ли адаптационные изменения организма, которые формируют виртуальный опыт, изменяющий индивидуальные характеристики взаимодействия с виртуальной средой.

Финансовая поддержка

Работа выполнена при поддержке гранта Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, № 0015902.

Литература

1. Карпов О. Э., Даминов В. Д., Новак Э. В., Мухометова Д. А., Слепнева Н. И. Технологии виртуальной реальности в медицинской реабилитации, как пример современной информатизации здравоохранения, *Вестник Национального медико-хирургического центра им. Н. И. Пирогова*, 2020, т. 15, № 1, с. 89–98.
2. Pereira J. S., Faêda L. M., Coelho A. M. Evolution of VRET to assist in the treatment of phobias: A systematic review. *22nd Symp. on Virtual and Augmented Reality*, 2020, pp. 386–390. doi:10.1109/SVR51698.2020.00064

3. Li Y., Chiu P., Yeh S., Zhou C., Chen J. Effects of virtual reality and augmented reality on induced anxiety. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2018, vol. 26, no. 7, pp. 1–8. doi:10.1109/ES.2017.28
4. Krohn S., Tromp J., Quinque E. M., Belger J., Klotzsche F., Gaebler M., Thöne-Otto A., Finke C. Multidimensional assessment of virtual reality applications in clinical neuropsychology: The “VR-check” protocol. *Intern. Conf. on Virtual Rehabilitation*, 2019, 12 p. doi:10.1109/ICVR46560.2019.8994590
5. Tychkov A. Yu., Chernyshov D. S., Bofanova N. S., Alimuradov A. K., Ovchinnikov D. L., Sotnikov A. M.

- Virtual reality implementation for assessment and treatment of phobic anxiety disorders. *5th Scientific School Dynamics of Complex Networks and their Applications*, 2021, pp. 202–205. doi:10.1109/DCNA53427.2021.9587127
6. **Бофанова Н. С., Буланов А. А., Яворский А. С., Алехина Е. В.** Технология виртуальной реальности как современное направление в реабилитации пациентов с фантомной болью. *Российский журнал боли*, 2021, № 19(2), с. 33–37. doi:10.17116/pain20211902133
 7. **Караваева Т. А., Васильева А. В., Мизинова Е. Б., Полторац С. В., Ляшкова С. В.** Клинические рекомендации «Тревожно-фобические расстройства F40». М., Российское общество психиатров, 2015. 50 с.
 8. **Botella C., Fernandez-Alvarez J., Guillén V., García-Palacios A., Baños R.** Recent progress in virtual reality exposure therapy for phobias: A systematic review. *Current Psychiatry Reports*, 2017, vol. 19, iss. 7, 13 p. doi:10.1007/s11920-017-0788-4
 9. **Indovina I., Conti A., Lacquaniti F., Staab J. P., Passamonti L., Toschi N.** Lower functional connectivity in vestibular-limbic networks in individuals with subclinical agoraphobia. *Frontiers in Neurology*, 2019, vol. 10, 13 p. doi:10.3389/fneur.2019.00874
 10. **Hasani J., Rasti A.** The comparison of implicit and explicit memory bias to negative information processing in adolescents with high and low trait anxiety. *Journal of Psychology*, 2010, vol. 4, pp. 11–22.
 11. **Gaur S., Panjwani U., Kumar B.** EEG brain wave dynamics: A systematic review and meta analysis on effect of yoga on mind relaxation. *J Biomed Res Environ Sci*, 2020, vol. 1, iss 7, pp. 353–362. doi:10.37871/jbres1166
 12. **Freeman D., Reeve S., Robinson A., Ethlers A., Clark D., Spanlang B., Slater M.** Virtual reality in the assessment, understanding, and treatment of mental health disorders. *Psychological Medicine*, 2017, vol. 47, iss. 14, pp. 2393–2400. doi:10.1017/S003329171700040X
 13. **Jang D. P., Ku J. H., Choi Y. H., Wiederhold B. K., Nam S. W., Kim In Y., Kim Sun I.** The development of virtual reality therapy (VRT) system for the treatment of acrophobia and therapeutic case. *IEEE Trans Inf Technol Biomed*, 2002, pp. 213–220. doi:10.1109/titb.2002.802374
 14. **Jadhav L., Parekh K., Gupta V., Chandak S.** Using virtual reality for therapeutic treatment of phobia. *IEEE Intern. Conf. on Convergence to Digital World – Quo Vadis*, 2020, 8 p. doi:10.1109/IC-CDW45521.2020.9318727
 15. **Бофанова Н. С., Петрова Е. В., Калистратов В. Б., Нестеренко Е. Н., Чиж Д. И.** Применение технологии виртуальной реальности для лечения болевого синдрома у детей. *Ульяновский медико-биологический журнал*, 2020, № 4, с. 19–29. doi:10.34014/2227-1848-2020-4-19-29
 16. **Malbos E., Burgess G., Lançon C.** Virtual reality and fear of shark attack: A case study for the treatment of squalophobia. *Clinical Case Studies*, vol. 19, pp. 339–354. doi:10.1177/1534650120940014
 17. **Тычков А. Ю., Чернышов Д. С., Бофанова Н. С., Алимуратов А. К., Овчинников Д. Л., Сотников А. М.** Применение VR для контроля и коррекции фобических тревожных расстройств. *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*, 2021, № 4, с. 84–92. doi:10.21685/2307-5538-2021-4-10
 18. **Somrak A., Pogacnik M., Guna J.** Suitability and comparison of questionnaires assessing virtual reality-induced symptoms and effects and user experience in virtual environments. *Sensors*, 2021, vol. 21, iss. 4, pp. 1185. doi:10.3390/s21041185
 19. **Меньшикова Г. Я., Ковалев А. И.** Векция в виртуальных средах: психологические и психофизиологические механизмы формирования. *Национальный психологический журнал*, 2015, № 4, с. 91–104. doi:10.11621/npj.2015.0409
 20. **Yang J. H., Ryu J. J., Nam E., Lee H.-S., Lee J. K.** Effects of preoperative virtual reality magnetic resonance imaging on preoperative anxiety in patients undergoing arthroscopic knee surgery: a randomized controlled study. *Arthrosc. J. Arthrosc. Relat. Surg.*, 2019, vol. 35, iss. 8, pp. 2394–2399. doi:10.1016/j.arthro.2019.02.037
 21. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/> (дата обращения: 11.03.2022).
 22. *Integrated development environment for R*. Studio, PBC, Boston, MA. <http://www.rstudio.com/> (дата обращения: 11.03.2022).
 23. *Extension to 'ggplot2'. R package version 2.1.2*. <https://CRAN.R-project.org/package=Ggally> (дата обращения: 18.04.2022).
 24. *Generate alluvial plots with a single line of code. R package version 0.3.0*. <https://CRAN.R-project.org/package=easyalluvial> (дата обращения: 18.04.2022).

UDC 004.946

doi:10.31799/1684-8853-2022-4-58-67

Search for EEG signal patterns in simulating phobic anxiety disorder situations in a VR environmentA. Yu. Tychkov^a, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0002-2354-2895, tyckov-a@mail.ruD. S. Chernykhov^a, Programmer Engineer, orcid.org/0000-0002-1604-7001P. P. Churakov^a, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0002-5918-732XZ. M. Yuldashev^b, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0003-1075-3420N. S. Bofanova^a, PhD, Med., Associate Professor, orcid.org/0000-0002-5455-4987A. K. Alimuradov^a, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0002-5133-2713V. N. Gorbunov^a, PhD, Econ., Associate Professor, orcid.org/0000-0003-0195-0772R. V. Zolotarev^a, Programmer Engineer, orcid.org/0000-0002-5614-6557M. S. Nikitin^a, Programmer Engineer, orcid.org/0000-0002-5708-3391^aPenza State University, 40, Krasnaya St., 440000, Penza, Russian Federation^bSaint-Petersburg Electrotechnical University «LETI», 5, Prof. Popov St., 197376, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Effective and prompt formulation of diagnostic conclusions about the presence of anxiety-phobic disorders requires the improvement of existing and the development of new methods for diagnosing and treating patients, including the use of virtual reality technology. **Purpose:** To analyze a reaction of an individual to a stimulus that triggers a fear response to virtual reality scenes (height exposure). To identify electroencephalographic (EEG) signal markers related to the level of anxiety and virtual reality environment susceptibility of an individual. **Methods:** A group of nine conditionally healthy males aged 23 to 26 years old who reported neither history of somatic symptoms nor organic brain disorders was formed to conduct the research. The immersion into virtual reality was accompanied by the registration of EEG signals and subsequent completion of a self-assessment questionnaire by the subjects. **Results:** The state of rest (a reference value) and the state of high emotional stress experience (at the height of a skyscraper) in the virtual reality environment were compared. The results obtained allow to make a conclusion that the simulated situation of being at a height causes a decrease in the indices of alpha, theta, beta rhythms, and an increase in the delta rhythm index of the EEG signal relative to the state of rest in various subjects, regardless of the intensity of fear manifestation. **Practical relevance:** The conducted research is among the pioneering studies in assessing the effect of virtual reality technologies on human phobic anxiety state. Some objective electrophysiological markers related to the level of anxiety were determined to confirm the presence of patterns in the functional state of the cerebral cortex with a sense of anxiety in individuals immersed in a virtual reality environment.

Keywords – virtual reality, phobic anxiety disorders, electroencephalographic signal.

For citation: Tychkov A. Yu., Chernykhov D. S., Churakov P. P., Yuldashev Z. M., Bofanova N. S., Alimuradov A. K., Gorbunov V. N., Zolotarev R. V., Nikitin M. S. Search for EEG signal patterns in simulating phobic anxiety disorder situations in a VR environment. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2022, no. 4, pp. 58–67 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2022-4-58-67

Financial support

The work was supported by a grant from the Fund for the Promotion of the Development of Small Businesses in the Sphere of Science and Technology, № 0015902.

References

- Karpov O. E., Daminov V. D., Novak E. V., Mychametova D. A., Slepnyova N. I. Virtual reality technologies in medical rehabilitation as an example of modern health informatization. *Bulletin of Pirogov National Medical and Surgical Center*, 2020, vol.15, no. 1, pp. 89–98.
- Pereira J. S., Faêda L. M., Coelho A. M. Evolution of VRET to assist in the treatment of phobias: A systematic review. *22nd Symp. on Virtual and Augmented Reality*, 2020, pp. 386–390. doi:10.1109/SVR51698.2020.00064
- Li Y., Chiu P., Yeh S., Zhou C., Chen J. Effects of virtual reality and augmented reality on induced anxiety. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2018, vol. 26, no. 7, pp. 1–8. doi:10.1109/ES.2017.28
- Krohn S., Tromp J., Quinque E. M., Belger J., Klotzsche F., Gaebler M., Thöne-Otto A., Finke C. Multidimensional assessment of virtual reality applications in clinical neuropsychology: The “VR-check” protocol. *Intern. Conf. on Virtual Rehabilitation*, 2019, 12 p. doi:10.1109/ICVR46560.2019.8994590
- Tychkov A. Yu., Chernykhov D. S., Bofanova N. S., Alimuradov A. K., Ovchinnikov D. L., Sotnikov A. M. Virtual reality implementation for assessment and treatment of phobic anxiety disorders. *5th Scientific School Dynamics of Complex Networks and their Applications*, 2021, pp. 202–205. doi:10.1109/DCNA53427.2021.9587127
- Bofanova N. S., Bulanov A. A., Yavorsky A. S., Alyokhina E. V. Virtual reality technology as a modern direction in the rehabilitation of patients with phantom pain. *Russian Journal of Pain*, 2021, no. 19(2), pp. 33–37 (In Russian). doi:10.17116/pain20211902133
- Karavaeva T. A., Vasilyeva A. V., Mizinova E. V., Poltorak S. V., Lyashkovskaya S. V. Clinical recommendations Anxiety-phobic disorders F40. Moscow, Russian Society of Psychiatrists, 2015. 50 p. (In Russian).
- Botella C., Fernandez-Alvarez J., Guillén V., García-Palacios A., Baños R. Recent progress in virtual reality exposure therapy for phobias: A systematic review. *Current Psychiatry Reports*, 2017, vol. 19, iss. 7, 13 p. doi:10.1007/s11920-017-0788-4
- Indovina I., Conti A., Lacquaniti F., Staab J. P., Passamonti L., Toschi N. Lower functional connectivity in vestibular-limbic networks in individuals with subclinical agoraphobia. *Frontiers in Neurology*, 2019, vol. 10, 13 p. doi:10.3389/fneur.2019.00874
- Hasani J., Rasti A. The comparison of implicit and explicit memory bias to negative information processing in adolescents with high and low trait anxiety. *Journal of Psychology*, 2010, vol. 4, pp. 11–22.
- Gaur S., Panjwani U., Kumar B. EEG brain wave dynamics: A systematic review and meta analysis on effect of yoga on mind relaxation. *J Biomed Res Environ Sci*, 2020, vol. 1, iss. 7, pp. 353–362. doi:10.37871/jbres1166
- Freeman D., Reeve S., Robinson A., Ethlers A., Clark D., Spanlang B., Slater M. Virtual reality in the assessment, understanding, and treatment of mental health disorders. *Psychological Medicine*, 2017, vol. 47, iss. 14, pp. 2393–2400. doi:10.1017/S003329171700040X
- Jang D. P., Ku J. H., Choi Y. H., Wiederhold B. K., Nam S. W., Kim In Y., Kim Sun I. The development of virtual reality therapy (VRT) system for the treatment of acrophobia and

- therapeutic case. *IEEE Trans Inf Technol Biomed*, 2002, pp. 213–220. doi:10.1109/titb.2002.802374
14. Jadhav L., Parekh K., Gupta V., Chandak S. Using virtual reality for therapeutic treatment of phobia. *IEEE Intern. Conf. on Convergence to Digital World – Quo Vadis*, 2020, 8 p. doi:10.1109/ICCDW45521.2020.9318727
 15. Bofanova N. S., Petrova E. V., Kalistratov V. B., Nesterenko E. N., Chizh D. I. Using virtual reality for pain management in children. *Ul'yanovskiy mediko-biologicheskii zhurnal*, 2020, no. 4, pp. 19–29 (In Russian). doi:10.34014/2227-1848-2020-4-19-29
 16. Malbos E., Burgess G., Lançon C. Virtual reality and fear of shark attack: A case study for the treatment of squalophobia. *Clinical Case Studies*, vol. 19, pp. 339–354. doi:10.1177/1534650120940014
 17. Tychkov A. Yu., Chernyshov D. S., Bofanova N. S., Alimuradov A. K., Ovchinnikov D. L., Sotnikov A. M. VR implementation for control and correct phobic anxiety disorders. *Measurements. Monitoring. Management. Control*, 2021, no. 4, pp. 84–92 (In Russian). doi:10.21685/2307-5538-2021-4-10
 18. Somrak A., Pogacnik M., Guna J. Suitability and comparison of questionnaires assessing virtual reality-induced symptoms and effects and user experience in virtual environments. *Sensors*, 2021, vol. 21, iss. 4, pp. 1185. doi:10.3390/s21041185
 19. Menshikova G. Y., Kovalev A. I. Vection in virtual environments: psychological and psychophysiological mechanisms. *National Psychological Journal*, 2015, no. 4, pp. 91–104 (In Russian). doi:10.11621/npj.2015.0409
 20. Yang J. H., Ryu J. J., Nam E., Lee H.-S., Lee J. K. Effects of preoperative virtual reality magnetic resonance imaging on preoperative anxiety in patients undergoing arthroscopic knee surgery: a randomized controlled study. *Arthrosc. J. Arthrosc. Relat. Surg.*, 2019, vol. 35, iss. 8, pp. 2394–2399. doi:10.1016/j.arthro.2019.02.037
 21. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Available at: <https://www.R-project.org/> (accessed 11 March 2022).
 22. *Integrated development environment for R*. Studio, PBC, Boston, MA. Available at: <http://www.rstudio.com/> (accessed 11 March 2022).
 23. *Extension to 'ggplot2'*. R package version 2.1.2. Available at: <https://CRAN.R-project.org/package=GGally> (accessed 18 April 2022).
 24. *Generate alluvial plots with a single line of code*. R package version 0.3.0. Available at: <https://CRAN.R-project.org/package=easyalluvial> (accessed 18 April 2022).

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Научные базы данных, включая Scopus и Web of Science, обрабатывают данные автоматически. С одной стороны, это ускоряет процесс обработки данных, с другой — различия в транслитерации ФИО, неточные данные о месте работы, области научного знания и т. д. приводят к тому, что в базах оказывается несколько авторских страниц для одного и того же человека. В результате для всех по отдельности считаются индексы цитирования, что снижает рейтинг ученого.

Для идентификации авторов в сетях Thomson Reuters проводит регистрацию с присвоением уникального индекса (ID) для каждого из авторов научных публикаций.

Процедура получения ID бесплатна и очень проста, есть возможность провести регистрацию на 12 языках, включая русский (чтобы выбрать язык, кликните на зеленое поле сверху справа на стартовой странице): <https://orcid.org>